

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Acompanhamento da construção de uma captação de água subterrânea

Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

Hélder Nuno Ribeiro Baptista

Trabalho de Projeto orientado por:
Prof. Doutora Catarina Silva
Doutor Albino Medeiros

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



Acompanhamento da construção de uma captação de água subterrânea

Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

Hélder Nuno Ribeiro Baptista

Trabalho de Projeto orientado por:
Prof. Doutora Catarina Silva
Doutor Albino Medeiros

2016

O presente trabalho não está redigido segundo as normas do novo acordo ortográfico.

Agradecimentos

A realização deste trabalho apesar de não ter sido vocacionado para o desenvolvimento de algo novo na área da hidrogeologia representou para mim uma grande oportunidade de crescer e aprender, melhorando as minhas competências. Quero deixar uma palavra de apreço a todos os que estiveram presentes comigo neste percurso.

Um agradecimento especial à professora Catarina Silva, pelos ensinamentos transmitidos ao longo desta caminhada, pela disponibilidade na orientação e revisão deste trabalho.

Um agradecimento igualmente especial ao meu co-orientador, o professor Albino Medeiros, pelo fornecimento da bibliografia bem como a indicação de uma obra com interesse científico para ser acompanhada e que viria a servir de caso de estudo para o presente trabalho.

A toda a equipa da empresa Carlos Barreira Rodrigues, o meu obrigado pela integração, em particular ao senhor Carlos pela disponibilidade em responder a dúvidas em contexto de obra bem como a cedência de dados.

Resumo

Numa época de mudança de paradigma na exploração de recursos naturais, é sobre os de mais fácil acesso que se têm verificado mudanças importantes. As águas subterrâneas são exemplo disso e constituem já a principal fonte de abastecimento de água para os mais diversos fins em muitos países. De acordo com a Versão Provisória do Plano Nacional da Água (PNA; MAOT; 2001) em Portugal Continental, para abastecimento público, são consumidos 349 hm³/a de água de origem subterrânea, que representa 62% do total consumido, a indústria consome cerca de 179 hm³/a (46% do total) e para a rega foram estimados consumos de 4210 hm³/a, representando um total de 64%.

O aumento de consumo de recursos hídricos de origem subterrânea pode ser explicado pela menor susceptibilidade de estes serem afectados pela poluição e fenómenos hidrológicos extremos (secas prolongadas), que levam à degradação da qualidade e a variações sazonais acentuadas nas reservas como se verifica nos recursos hídricos superficiais.

É por isso importante apostar na valorização e adopção de boas práticas de construção de captações de água subterrânea, com vista a uma exploração sustentada do recurso.

Neste trabalho são descritas as etapas do processo de licenciamento, apresentadas as principais etapas nas operações de perfuração e construção de captações de água subterrânea.

Por fim, como complemento, é apresentado um caso de estudo referente à construção de um furo de captação de água subterrânea destinado ao abastecimento público de duas localidades no município da Moita. Este furo foi construído com recurso à técnica de furação à rotação por circulação inversa, tendo atingido os 251 metros de profundidade e capta águas de níveis aquíferos da base do Pliocénico no aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado.

Palavras-chave: hidrogeologia, legislação, captações de água subterrânea, caracterização hidráulica, Moita

Abstract

In a time of change of paradigm, in the exploration of natural resources, it is on those which have much easier access that have been suffering significant changes. The exploitation of water resources from an underground source is an example of this and is already the main source of water supply for different purposes in many countries. According to the Interim National Water Plan Version (PNA; MAOT; 2001), in Portugal for public supply are consumed 349 hm³/a of groundwater source, which represents 62% of total consumption, the industry consumes about 179 hm³/a (46% of total) and to irrigation consumption were estimated for 4210 hm³/a, for a total of 64%.

The increased consumption of water from underground sources can be explained by the lower susceptibility of these are affected by pollution and extreme hydrological phenomena (prolonged droughts), as seen in the degradation of quality and sharp seasonal variations in water reserves found on the surface.

It is therefore important to invest in recovery and adoption of good construction practices of water wells, with a view to sustainable exploitation of the resource.

This paper describes the stages of the licensing process, presented the key steps in drilling operations and construction of water wells.

Finally, in addition, we present a case study of the construction of an water well for the public supply of two locations in the municipality of Moita. This well was drilled using the rotary with reverse circulation technique, reaching 251 meters deep and captures water from aquifer levels of the base of the Pliocene on the aquifer of the left bank of the Tagus-Sado Basin.

Key-words: hydrogeology, law, water wells, hydraulic characterization, Moita

Índice geral

Agradecimentos.....	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice de figuras.....	viii
Índice de tabelas	ix
Acrónimos	x
1. Introdução	1
1.1. Objectivo e importância do tema.....	2
1.2. Estrutura e metodologia.....	2
2. Pressupostos e evolução até ao estado actual da técnica	3
2.1. Enquadramento legal português.....	4
2.1.1. Águas de domínio privado	4
2.1.2. Águas de domínio público.....	5
2.1.3. Empresas executantes de furos de captação de água	5
2.2. Etapas de construção de uma captação de água subterrânea	6
3. Estudo geológico/hidrogeológico.....	7
3.1. Prospekção hidrogeológica	7
3.2. Projecto de construção da captação.....	8
4. Construção.....	9
4.1. Métodos de furação.....	9
4.1.1. Rotopercussão	10
4.1.2. Rotação	12
4.1.2.1. Sistema de circulação directa	14
4.1.2.2. Sistema de circulação inversa.....	15
4.1.3. Comparação entre métodos	16
4.2. Diâmetros de furação.....	16
4.3. Controlo da verticalidade e linearidade da perfuração	17
4.4. Amostragem durante a furação	18
4.5. Diagrafias.....	18
4.6. Coluna de revestimento	19
4.7. Maciço filtrante	22
4.8. Isolamentos intercalares	23
4.9. Limpeza e desenvolvimento	23

4.10. Isolamento sanitário.....	24
5. Exploração	25
5.1. Ensaio de caudal.....	25
5.1.1 Ensaio de bombeamento.....	27
5.1.2 Ensaio de caudal escalonado.....	31
5.2. Colheita de amostras de água.....	32
5.3. Relatório hidrogeológico da captação	32
5.4. Dimensionamento do equipamento de extracção e tubagem de adução da CAS.....	34
6. Caso de estudo - Construção da captação CBR3.....	35
6.1. Enquadramento geográfico	36
6.2. Enquadramento geológico e estratigráfico	37
6.3. Enquadramento climático.....	41
6.4. Enquadramento hidrogeológico.....	42
7. Caracterização da construção da captação CBR3.....	49
7.1. Método de furação	49
7.2. Amostragem.....	50
7.3. Coluna de revestimento	52
7.4. Maciço filtrante e isolamentos intercalares	53
7.5. Limpeza e desenvolvimento	54
7.6. Ensaio de caudal escalonado	55
7.7. Desmontagem do estaleiro de construção	59
7.8. Isolamento sanitário e instalação do equipamento de bombagem.....	60
8. Considerações finais e conclusões.....	61
9. Referências bibliográficas.....	63
Anexo nº1 – Coluna litostratigráfica e esquema da CAS (CBR3)	65
Anexo nº2 – Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado na CAS CBR3	68

Índice de figuras

Figura 1 – Principais etapas para a implementação de uma captação de água subterrânea. ____	6
Figura 2 - Movimento de rotação e percussão, adaptado de Graça (2012). _____	10
Figura 3 - Sonda de furação por rotopercussão, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012). _____	11
Figura 4 - Movimentos de rotação, adaptado de Graça (2012). _____	12
Figura 5 - Sonda de furação à rotação, circulação directa, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012). _____	14

Figura 6 - Sonda de furação à rotação, circulação inversa, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).	15
Figura 7 - Diâmetros principais a ter em conta na construção de uma CAS	17
Figura 8 - Principais tipos de ranhura dos tubos-ralo, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).	21
Figura 9 - Representação do cone de rebaixamento, adaptado de Kruseman e Ridder (1994).	26
Figura 10 - Recinto do polo de CAS de Rego de Água, Moita.	35
Figura 11 - Enquadramento geográfico e administrativo do local de construção da CAS CBR3.	36
Figura 12 – Extracto da Carta Geológica 34-D, zona de implementação da CAS e respectiva legenda (adaptado de Pais <i>et al.</i> , 2006).	38
Figura 13 - Temperatura média anual, adaptado de APA (2015).	41
Figura 14 - Precipitação média anual, adaptado de APA (2015).	41
Figura 15 - Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental, retirado de SNIRH (2015).	42
Figura 16 - Sistemas aquíferos da Bacia do Tejo-Sado, retirado de SNIRH (2015).	43
Figura 17 - Litostratigrafia do sistema aquífero da Margem Esquerda da Bacia do Tejo-Sado, retirado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	44
Figura 18 - Corte geológico Xabregas-Palmela, adaptado de Simões (1998).	45
Figura 19 - Mapa de Isopiezas para o sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado, com a zona de estudo (assinalada a azul), adaptado de Simões (1998).	46
Figura 20 - Diagrama de Piper, águas captadas do Pliocénico e Miocénico franc. marinho, adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	48
Figura 21 - Amostras recolhidas a cada metro de furação.	50
Figura 22 - Tubagem de revestimento para a zona captante.	52
Figura 23 – Esquema da configuração da coluna de revestimento.	52
Figura 24 - Seixo para a construção do maciço filtrante.	53
Figura 25 - Aplicação do método de limpeza e desenvolvimento "air-lift".	54
Figura 26 – Equipamento para a realização do ensaio de caudal escalonado.	55
Figura 27 – Rebaixamentos medidos no furo em relação à duração do ensaio.	56
Figura 28 - Rebaixamento específico vs caudais acumulados.	56
Figura 29 – Representação gráfica das curvas características da captação: perdas de carga lineares (BQ, a vermelho), rebaixamento ($BQ+CQ^2$, a azul) em função de diversos caudais teóricos de exploração e a respectiva eficiência da captação (EFC, a verde) para a CAS CBR3.	58
Figura 30 – Vala para a drenagem do tanque de decantação de lamas.	59
Figura 31 – Ribeiro resultante da drenagem do tanque de lamas.	59
Figura 32 - Caixa da CAS CBR3.	60
Figura 33 - Tubagem de adução.	60
Figura 34 - Coluna litostratigráfica e esquema de construção da CAS CBR3.	67

Índice de tabelas

Tabela 1 - Estatísticas dos caudais das captações implantadas no Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	47
---	----

Tabela 2 - Valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento calculados para o Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	47
Tabela 3 - Valores de transmissividades estimadas por caudais específicos para o Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida <i>et al.</i> (2000).	47
Tabela 4 - Intervalos de profundidade dos níveis alvo definidos com base na amostragem realizada.	51
Tabela 5 - Resumo da variação de caudal, rebaixamento e rebaixamento específico para os dois escalões testados.	56
Tabela 6 - Cálculo da eficiência da CAS para diferentes caudais teóricos de exploração.	57
Tabela 7 - Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado em Nov-2015 na CAS CBR3.	68

Acrónimos

AISI - American Iron and Steel Institute

APA - Agência Portuguesa do Ambiente

ARH – Administração de Região Hidrográfica

CAS – Captações de água subterrânea

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NHE – Nível hidrostático

NHD – Nível hidrodinâmico

PVC – Poli (cloreto de vinilo)

SNIRH - Serviço Nacional de Informação de Recursos Hídricos

VMA – Valores máximos admitidos

VMR – Valores máximos recomendados

1. Introdução

A água constitui um valioso recurso natural, essencial à vida. Apesar de abundante na Terra, só ínfima parte está disponível para aproveitamento directo pelo homem, apesar disso só muito recentemente começou a surgir a consciencialização dos limites da sua real disponibilidade.

O ciclo hidrológico encerra um conjunto de componentes responsáveis pelo movimento contínuo da água e sua mudança de estado físico entre a atmosfera, biosfera, geosfera e hidrosfera e cujo movimento, tem como “motores” a energia solar, mas também a energia gravítica.

De forma simplificada, a água presente à superfície do globo, seja nos oceanos, mares, lagos e rios é sujeita a evaporação e evapotranspiração e por sua vez passa do estado líquido a gasoso, segue-se a condensação, formação de nuvens, e devido à dinâmica atmosférica, a precipitação (sob os diferentes estados) da água presente nas nuvens. Ao atingir de novo a superfície terrestre esta alimentará os cursos de água superficial originando o escoamento superficial. Contudo nem toda a água seguirá directamente o caminho anterior, podendo infiltrar-se, constituindo assim o escoamento subterrâneo.

As águas subterrâneas constituem o denominado escoamento subterrâneo, o membro escondido do ciclo hidrológico, correspondem às águas que se infiltram e circulam no interior da Terra, seja ao longo da zona não saturada do solo até atingir certas formações geológicas saturadas, os aquíferos. Ao atingir formações aquíferas as águas subterrâneas irão por sua vez exercer a recarga das mesmas formações, aumentando o volume previamente armazenado. Aos aquíferos reconhece-se não só a capacidade de armazenar, mas também de transmitir água em quantidades economicamente viáveis. Posteriormente a água armazenada irá ser descarregada, alimentando nascentes, rios, lagos, fechando-se assim o ciclo.

É sobre a água armazenada nestas formações que servem de alvo de captação por diversos tipos de estruturas antropogénicas, das quais se destacam os furos de captação. Consistem por norma em furações preferencialmente verticais e com uma razão de diâmetro em relação à profundidade atingida muito baixa, nas quais se instala uma tubagem com zonas que permitam a entrada de água no interior da captação e um equipamento para extracção da mesma.

Os furos de captação podem por isso ser definidos como obras pontuais, de maior ou menor complexidade, que servem de ligação entre a água dos aquíferos e a superfície, com o objectivo de a captar, seja por exemplo para abastecimento populacional, industrial, agrícola ou rebaixar o nível piezométrico em obras de engenharia. Na extracção de água de origem subterrânea é imperativo seguir um plano de exploração e gestão sustentada do recurso. Para além da adopção de boas práticas na construção deste tipo de estrutura, este plano deve visar, por exemplo, a gestão dos caudais extraídos de captações implementadas nos diferentes aquíferos para que sejam compatíveis com a recarga natural que estes recebem de forma a manter o aspecto quantitativo do recurso a longo prazo ou o cumprimento das restrições de utilização do solo nos perímetros de protecção em captações destinadas ao abastecimento público e que visam o aspecto qualitativo das referidas águas.

1.1. Objectivo e importância do tema

O presente trabalho tem como objectivo principal acompanhar a construção de uma captação de água subterrânea, de forma a ser uma mais valia no conhecimento pessoal nesta área. Para cumprir este objectivo na parte inicial deste trabalho são abordadas as principais etapas para a implementação de uma captação de água subterrânea. Contudo a parte inicial deste trabalho não pode ser vista, nem tem pretensões de ser um guia completo para a execução de furos e a construção de captações de água subterrânea, pois cada caso apresenta singularidades que advêm em primeira análise da finalidade das águas a captar. A construção de furos de captação deve resultar de uma fase de ante-projecto e projecto bem planeada que em certos casos exige uma compilação de dados provenientes de diversas áreas do saber, resultantes de estudos hidrogeológicos, geofísicos ou até de viabilidade-económica. Na segunda parte deste é apresentado um caso prático, referente ao acompanhamento da construção de uma captação de água subterrânea para abastecimento público de duas localidades no município da Moita.

1.2. Estrutura e metodologia

Este relatório de projecto divide-se em oito capítulos, desde a introdução e objectivos às considerações finais e conclusões.

Nos primeiros cinco capítulos, resultantes essencialmente de pesquisa bibliográfica, é feita uma abordagem geral e recomendações para a implementação de captações de água subterrânea, desde o enquadramento legal vigente para estas obras, passando pelas etapas de construção das mesmas.

No sexto capítulo é feito o enquadramento geográfico, geológico, climático e hidrogeológico referente ao caso de estudo acompanhado, a construção de uma captação de água subterrânea destinada ao abastecimento público de duas localidades no município da Moita. No sétimo capítulo são caracterizadas as etapas de construção da mesma e no oitavo, são apresentadas as considerações finais e conclusões da realização deste trabalho.

2. Pressupostos e evolução até ao estado actual da técnica

Tal como referido no texto introdutório deste trabalho, o objectivo da construção de furos de captação é a extracção de água de aquíferos de forma a utilizar conforme uma necessidade. A água subterrânea ocorre no seio dos poros, fracturas, cavidades de certas formações geológicas saturadas, os aquíferos, sendo que estas apresentam variações no comportamento hidrogeológico conforme o ambiente geológico em que se desenvolvem. Classificam-se quanto à pressão da água armazenada em:

Aquíferos livres – são aquíferos em que a superfície livre, o nível freático, da água armazenada se encontra à pressão atmosférica.

Aquíferos confinados – são aquíferos limitados, superior e inferiormente, por formações impermeáveis. Nos aquíferos confinados, a água armazenada encontra-se submetida a uma pressão superior à pressão atmosférica, pelo que num furo que intersecte um aquífero confinado, o nível piezométrico sobe acima do limite superior do aquífero e estabiliza quando iguala a pressão atmosférica. Este fenómeno é conhecido por artesianismo. Se o nível subir acima do nível do terreno, o furo denomina-se artesiano repuxante.

Aquíferos semi-confinados - são aquíferos limitados superior e/ou inferiormente por formações semipermeáveis (aquitardos).

Convêm ainda definir:

Aquitardos – são formações geológicas capazes de armazenar água, mas que a transmitem muito lentamente, não sendo possível o seu aproveitamento directo. No entanto estas formações são importantes, pois podem permitir a recarga de aquíferos sub ou sobrejacentes.

Aquicludos – são formações geológicas que podem armazenar, mas não transmitem água, pois esta não consegue circular nas referidas formações.

Aquifugos – são formações geológicas que não armazenam nem transmitem água.

O aproveitamento e utilização de águas subterrâneas data de à cerca de 3000 anos, quando na Mesopotâmia apareceram os *qanats*, que correspondem a galerias horizontais escavadas de forma a intersectar o nível freático em aquíferos superficiais (Todd, 2005).

Ao longo das civilizações greco-romanas ocorreram várias teorias sobre a origem, ocorrência e circulação, contudo poucas se aproximam dos conhecimentos actuais.

Só o séc. XIX é que surgiram as primeiras teorias sobre a circulação, destacando-se Darcy, que através do seu trabalho experimental sobre a circulação de água em meios porosos implementou em 1856 a lei que rege o movimento de água subterrânea, a lei de Darcy (Todd, 2005). Ao longo do séc. XX, há que destacar vários desenvolvimentos ao nível da caracterização hidráulica, sob a forma de diversas leis para interpretação de rebaixamentos em ensaios de bombagem em furos de captação e que permitem caracterizar hidrogeologicamente os aquíferos, sendo devidas essencialmente a Thiem, Theis, Hantusch ou Jacob (Custódio e Llamas, 1983).

Relativamente às técnicas de furação para a construção de captações de água subterrânea, nas últimas décadas estas sofreram avanços significativos graças ao desenvolvimento das técnicas de furação implementadas na construção de poços de exploração de hidrocarbonetos. É certo que a técnicas de construção de captações de água subterrânea se inspiraram nos poços de petróleo, contudo, o desenvolvimento das técnicas de furação não podem ser vistas apenas como um subproduto da prospecção e exploração de hidrocarbonetos, pois os furos de captação de água ainda assim apresentam questões próprias. A utilização do sistema de furação por circulação inversa, a necessidade de construção de maciços filtrantes e o desenvolvimento de algumas técnicas de limpeza são alguns desses avanços (Custódio e Llamas, 1983).

2.1. Enquadramento legal português

De acordo com o regime jurídico português é considerado, no artigo 1385º do código civil a existência de dois domínios de titularidade, público ou privado, para as águas subterrâneas existentes no território nacional. A existência de dois domínios, definição e enquadramento legal para estas águas leva por sua vez a exigências diferentes relativas ao regime de licenciamento para a execução das captações. Resumidamente fazem parte do domínio público do Estado as águas minerais naturais, sendo que as restantes, nas quais se incluem as águas de nascente fazem parte do domínio privado.

2.1.1. Águas de domínio privado

A definição da propriedade das águas subterrâneas, particulares ou privadas, é estabelecida no artigo 1386º do código civil, onde se indica que são particulares “as águas que nascerem em prédio particular...” e “as águas subterrâneas existentes em prédios particulares”. Os aspectos relacionados com a legislação das águas subterrâneas em propriedade privada encontram-se dispersos entre os artigos 1385 º e o 1497º do código civil. Resumidamente fazem parte das águas de domínio privado as águas subterrâneas que cumpram os pressupostos anteriores e ainda as águas de nascente.

A definição de água de nascente consta no artigo 6º do Decreto-Lei 90/90, de 16 de Março, transcrevendo-se que: “Para efeitos do presente diploma, entende-se por águas de nascente as águas subterrâneas naturais que se não integrem no conceito de recursos hidrominerais, desde que na origem se conservem próprias para beber.” Segundo o preceituado do nº 3 do artigo 1º do mesmo diploma, as águas de nascente “Não se integram no domínio público do Estado, podendo ser objecto de propriedade privada ou outros direitos reais...”.

A execução e exploração de captações destinadas a aproveitamento de águas subterrâneas do domínio privado (sejam águas de nascente ou destinadas a abastecimento público, agrícola ou industrial) carecem de autorização prévia ou título de utilização, que se encontra previsto no nº 1 do artigo 62º da Lei nº 58/2005, de 29 de Dezembro, desde que os meios de extracção da água sejam superiores a 5 cv. Quando os meios de extração não excedam os 5 cv, salvo se a referida captação vier a ser caracterizada pela autoridade competente para o licenciamento como tendo um impacte significativo no estado das águas, a captação de águas particulares exige a simples comunicação do utilizador à entidade competente para a fiscalização de

utilização de recursos hídricos. A nível de Portugal Continental, a entidade responsável pelo licenciamento dos recursos hídricos é a Agência Portuguesa do Ambiente, através dos Departamentos de Administração de Região Hidrográfica territorialmente competentes (artigo 8.º da Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro, alterado pelo Decreto-lei n.º 130/2012, de 22 de Junho).

2.1.2. Águas de domínio público

Na lei nº 54/2005, de 15 de Novembro é definida em função da titularidade, quais os recursos hídricos pertencentes ao domínio público.

Apesar de na lei anterior não ser feita menção às águas minerais naturais, estas são consideradas, na alínea a) do nº 1 do artigo 3º do Decreto-lei 90/90 de 16 de Março como um recurso hidromineral, sendo que de acordo com alínea b), do nº 2, do artigo 1º do mesmo decreto-lei, os recursos hidrominerais são incluídos no domínio público do Estado.

A definição de água mineral natural consta no nº 2 do artigo 3º do mesmo decreto-lei, onde se menciona que: “Água mineral natural é uma água considerada bacteriologicamente própria, de circulação profunda, com particularidades físico-químicas estáveis na origem dentro da gama de flutuações naturais, de que resultam propriedades terapêuticas ou simplesmente efeitos favoráveis à saúde”.

As utilizações dos recursos hídricos do domínio público do Estado são tituladas por licenças ou concessões, em regra atribuídas por concurso público. O aproveitamento, pesquisa, licenciamento e exploração das águas minerais é definido no Decreto-Lei nº 86/90 de 16 de Março.

2.1.3. Empresas executantes de furos de captação de água

Relativamente ao regime de licenciamento das empresas que realizem furos de prospecção, pesquisa e captação de água subterrânea encontra-se definido no Decreto-Lei nº 133/2005 de 17 de Agosto, alterado pelo Decreto-Lei nº 84/2011 de 20 de Junho. Para exercerem a sua actividade estas empresas, de acordo com os referidos Decretos-lei, estão sujeitas à obtenção de uma licença para efeitos de protecção do ambiente e preservação dos recursos hídricos subterrâneos (Graça, 2012).

A licença para o exercício desse tipo de actividade é requerida junto da Administração de Região Hidrográfica (ARH) existente na área da sede social ou domicílio da entidade requerente.

No sentido de promover um incremento da qualificação técnica, a mesma legislação obriga as empresas licenciadas a possuírem um técnico com habilitações académicas adequadas ao exercício das suas funções, entenda-se com uma formação numa área técnico-científica tal como Geologia, Engenharia Geológica, Engenharia de Minas ou Engenharia dos Recursos Hídricos, com conhecimentos de Hidrogeologia.

2.2. Etapas de construção de uma captação de água subterrânea

Cada etapa conceptual do ciclo de vida de uma captação de água subterrânea (CAS): estudo geológico/hidrogeológico, construção e exploração, engloba um conjunto de procedimentos a executar de forma sequencial (Graça, 2012). Independentemente da especificidade e cuidados a adotar na construção destas estruturas dependerem em primeira análise da finalidade das águas a captar, para cada caso é conveniente a realização de um estudo geológico e hidrogeológico prévio no qual se deve fundamentar o projecto de construção da captação. Neste projecto, define-se o método de furação a utilizar, os diâmetros de furação, as diferentes etapas de construção e o método de limpeza/desenvolvimento.

A fase de construção engloba as operações de furação e caso sejam validadas as informações dos estudos geológicos/hidrogeológicos e/ou o furo se mostre produtivo para o fim a que se destina procede-se à construção da captação pela instalação da coluna de revestimento, construção do maciço filtrante e isolamentos. O último procedimento na etapa de construção, consiste na limpeza/desenvolvimento da captação com o intuito de promover e facilitar o afluxo de água e ao mesmo tempo remover eventuais lamas ou detritos de furação.

Após construída a captação, deverá realizar-se um ensaio de caudal que permitirá não só calcular os parâmetros hidráulicos do aquífero/captação e por conseguinte fornecer indicações sobre o dimensionamento do equipamento de extracção a instalar e recomendar um plano de exploração sustentável do recurso. Por fim procede-se à instalação da bomba submersível e respectiva tubagem de adução.

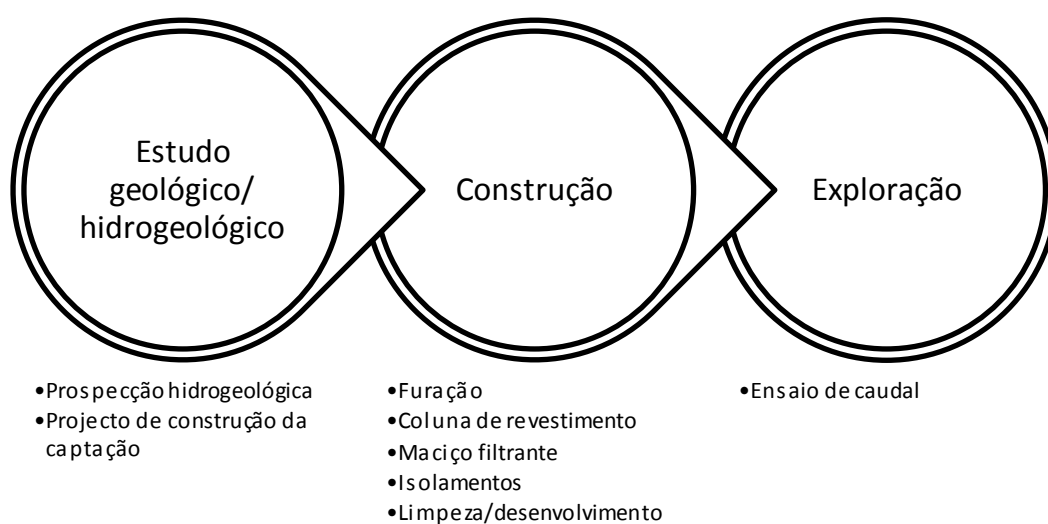


Figura 1 – Principais etapas para a implementação de uma captação de água subterrânea.

3. Estudo geológico/hidrogeológico

3.1. Prospekção hidrogeológica

Quando não existe um conhecimento hidrogeológico prévio da região de construção, um dos primeiros passos por parte da entidade que irá proceder à construção de uma CAS deve consistir na realização de um estudo geológico/hidrogeológico, de forma a poder elaborar um modelo hidrogeológico conceptual do sistema aquífero a explorar.

Estes estudos podem ter diferentes níveis de detalhe, tendo em consideração a finalidade da água a captar. Devem em todos os casos permitir definir, com razoável aproximação, a localização mais adequada da sondagem de pesquisa e eventual captação, a profundidade a atingir, a espessura estimada do aquífero e o tipo de formações a intersectar durante a fase de furação (Graça, 2012).

Na fase inicial destes estudos, pretende-se obter as respostas para as questões anteriores preferencialmente através da bibliografia existente (nomeadamente nos relatórios de construção de captações próximas, relatórios de sondagens geológico-geotécnicas, de trabalhos com informações relevantes realizados sobre o aquífero a explorar, entre outros).

Caso não existam dados de base ou estes não permitam caracterizar sumariamente o sistema aquífero a explorar, deverá estabelecer-se um programa de prospecção hidrogeológica, que englobe conforme a necessidade, as seguintes etapas (Silva, 2012):

- consulta de cartas geológicas, geomorfológicas, estruturais e de lineamentos;
- realização de fotointerpretação geológica – pela observação em relevo do terreno através de pares de fotografias com auxílio de estereoscópio e a identificação de estruturas geológicas como dobras, falhas, filões;
- reconhecimento do terreno - visita inicial ao terreno de forma a ter contacto com a realidade geológica e hidrogeológica, após a preparação de cartas ou bases de trabalho às escalas disponíveis e de acordo com o detalhe necessário do estudo. Na realização de trabalho de campo deve-se executar uma inventariação de pontos de água, interpretação de cortes geológicos e colheita de amostras;
- prospekção geofísica – baseia-se no estudo de uma determinada propriedade física das rochas, constituindo os métodos de eleição de prospecção em rochas fracturadas os métodos geoeléctricos (sondagens eléctricas verticais, perfis de resistividade aparente) e sísmicos (refracção e reflexão). Convém referir que a aplicação destes métodos serve principalmente o pressuposto de corroborar ou não hipóteses do que formulá-las.
- realização de sondagens mecânicas – de forma a confirmar todas as informações anteriores. Quando acauteladas medidas iniciais na implantação destas sondagens mecânicas de pesquisa, nomeadamente em termos de métodos de furação e diâmetros utilizados, se estas satisfizerem os requisitos esperados em termos de produtividade, poderão posteriormente ser transformadas em captações.

Silva (2012) refere ainda que: “Nenhum programa de prospecção oferece garantia plena de sucesso, na implantação de uma sondagem de pesquisa e eventual captação. Todavia, é certo que contribui para reduzir o risco de insucesso, e por consequência, o risco do investimento.”

3.2. Projecto de construção da captação

De acordo com Graça (2012) para cada CAS, cada caso é um caso, por isso é importante que, com base nos estudos geológicos e hidrogeológicos de superfície, seja elaborado um projecto de construção da captação a executar.

No projecto de construção deverá ser feita referência ao método de furação, à profundidade a atingir, aos diâmetros de furação, aos tipos e diâmetros das tubagens de revestimento a aplicar, à extensão de tubos-ralo e sectores a isolar.

Ter-se-á ainda que ter em conta, que no decurso da perfuração poderá ser necessário proceder ao ajustamento do projecto pré-definido, de modo a adaptá-lo às realidades geológica e hidrogeológica que vão sendo reveladas à medida que se prossegue em profundidade, as quais poderão, ou não, corroborar o modelo geológico/hidrogeológico interpretativo inicial e, consequentemente conduzir a eventuais alterações no projecto de construção da CAS.

4. Construção

4.1. Métodos de furação

Existem diversos métodos de furação utilizados neste tipo de obra. A escolha do método mais adequado para cada caso, definido em fase de projecto de construção, depende de diversos factores tais como: o contexto geológico/hidrogeológico em que se vai perfurar, das profundidades expectáveis dos níveis aquíferos e de razões económicas.

Actualmente no nosso país são utilizados essencialmente três métodos de furação, que se caracterizam por serem todos destrutivos (implicam a fragmentação das formações perfuradas):

- o método de furação por rotopercussão;
- o método de furação à rotação pelo sistema de circulação directa;
- o método de furação à rotação pelo sistema de circulação inversa.

Conforme o contexto geológico/hidrogeológico e/ou profundidades a atingir por vezes torna-se necessária a utilização de mais que um método para a mesma obra.

Apesar de muito difundido na literatura, o método de furação à percussão mecânica, pela furação com queda de um trépano e posterior remoção de detritos por limpadeira, encontra-se em desuso na prática portuguesa, nomeadamente por não permitir um rendimento comparável ao dos métodos referidos anteriormente.

4.1.1. Rotopercussão

O método de furação por rotopercussão baseia-se na acção de um pequeno movimento de rotação de um “bit” (trépano de pastilhas) transmitido pelas varas de sondagem e um movimento de percussão de elevada frequência e pequeno curso dado por um martelo de fundo de furo.

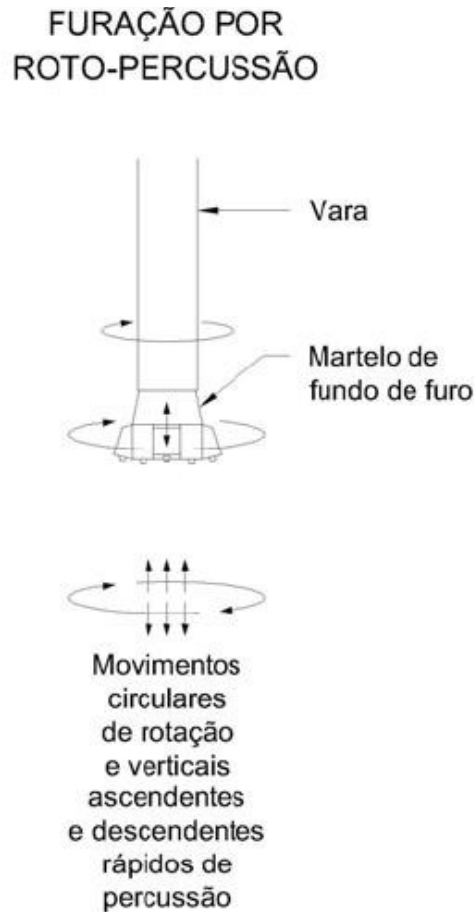


Figura 2 - Movimento de rotação e percussão, adaptado de Graça (2012).

Este método utiliza ar comprimido produzido a partir de um compressor, que é transmitido pelo interior da coluna de perfuração, passando pelo martelo e “bit”, servindo não só para accionar a ferramenta de percussão (martelo+bit), mas também como fluido de limpeza.

Os resíduos de furação, originados na base do furo pela ferramenta de percussão, são removidos pelo fluido de limpeza e transportados pelo mesmo até à superfície do furo. A limpeza contínua dos resíduos de furação permite o avanço da perfuração com a aplicação da percussão sobre uma nova superfície do maciço rochoso, fragmentando-a. O método consiste em fragmentar a rocha e limpar os resíduos em simultâneo com a passagem do fluido de circulação e a consequente adição das varas de sondagem a cada manobra (Graça, 2012).

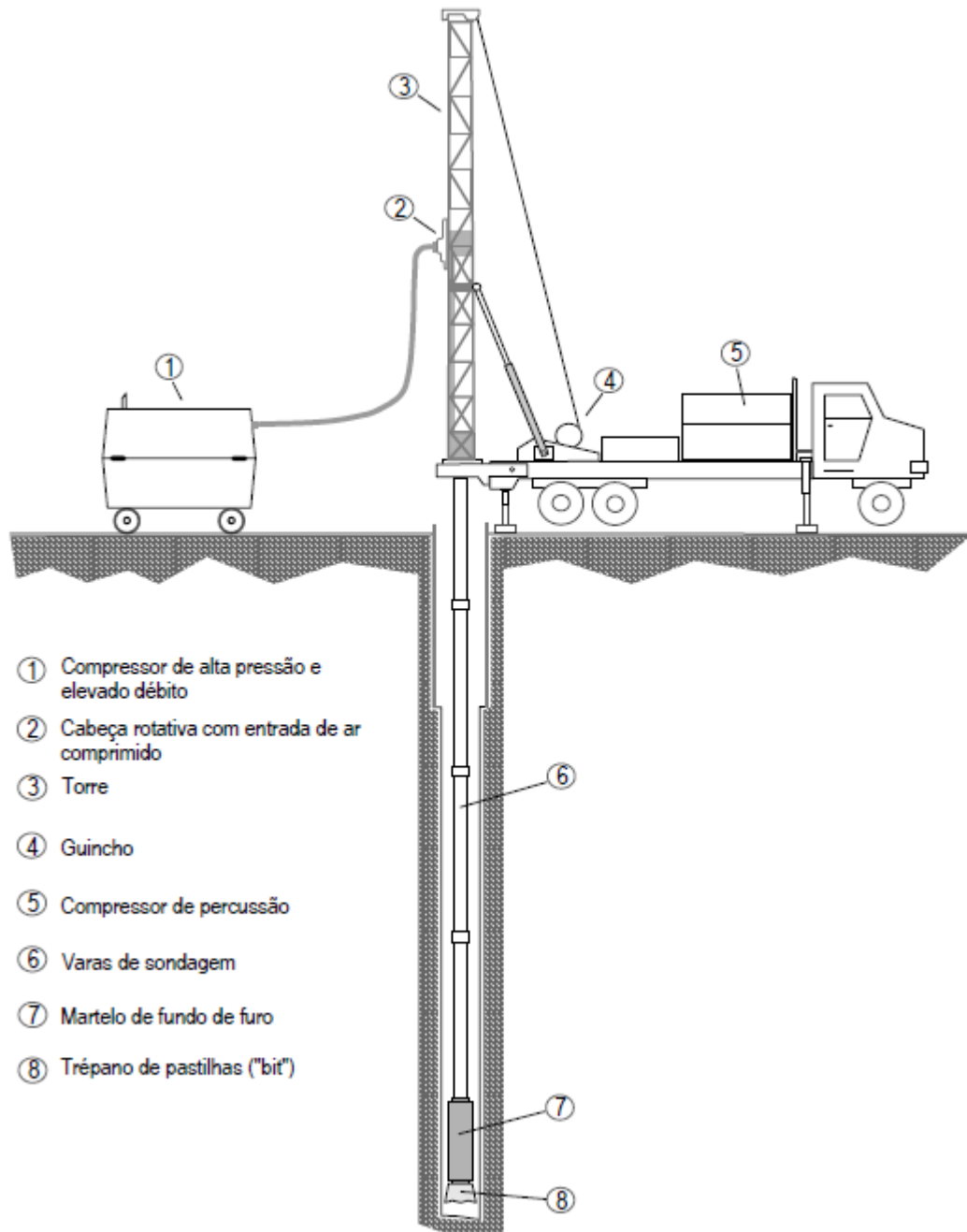


Figura 3 - Sonda de furação por rotopercussão, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).

4.1.2. Rotação

Nos sistemas de furação à rotação, a perfuração é realizada através do movimento de rotação transmitido a uma peça de corte específica (trialeta, tricone ou trépano) instalada na extremidade de uma coluna de perfuração.

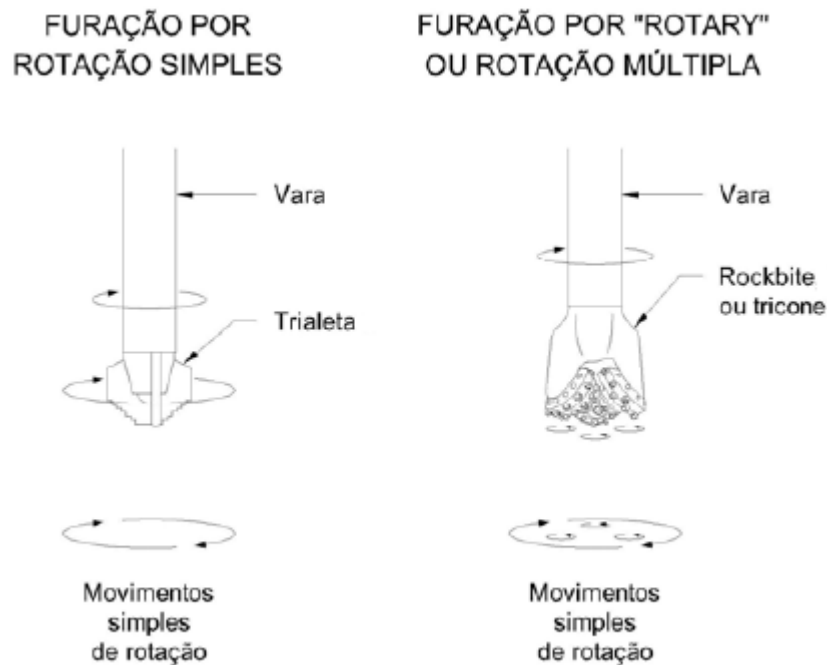


Figura 4 - Movimentos de rotação, adaptado de Graça (2012).

Outro elemento importante neste método é o peso aplicado à peça de corte no fundo do furo. Este resulta da constituição da própria coluna de furação formada pela vara quadrangular conhecida por vara/haste *kelly* somada à instalação de novas varas cilíndricas a cada manobra. Cada manobra corresponde por sua vez à instalação de varas cilíndricas quando a parte superior da vara *kelly* atinge a mesa de rotação, aquela vara é elevada e desconectada da vara cilíndrica situada imediatamente abaixo, a qual por sua vez é mantida suspensa junto à mesa de rotação. A esta vara cilíndrica é acoplada uma nova vara cilíndrica, com dimensão idêntica à da vara *kelly*. As varas cilíndricas são descidas no furo de modo a que o topo da nova vara acoplada fique suspenso ao nível da mesa de rotação, procedendo-se à conexão da vara *kelly* ao topo da nova vara cilíndrica acoplada. Após a conexão daquelas duas varas, a base da vara *kelly* fica posicionada ao nível da mesa de rotação. A perfuração prossegue até que o topo da vara *kelly* atinja de novo a mesa de rotação, repetindo-se o processo (Graça, 2012).

Em complemento à rotação e peso aplicado à peça de corte no terreno, estes métodos utilizam como fluído de perfuração, as denominadas lamas de estabilização. Estas lamas são preparadas pela mistura, em proporções adequadas, de água e argilas expansivas (por norma bentonite) de forma a comportarem-se como um líquido viscoso. Estas são introduzidas no circuito de circulação dos sistemas de perfuração à rotação e têm como função arrastar os detritos da formação perfurada para a superfície e criar uma pressão hidrostática no interior do furo que fique em equilíbrio com o estado de tensão, das formações que constituem as

paredes do furo, ou com a pressão hidrostática dos níveis aquíferos que forem sendo atravessados para que as paredes do furo não desabem à medida que a furação avança.

O controlo da densidade e viscosidade das lamas de furação preparadas, conjugadas com a velocidade de ascensão das mesmas é um factor importante nos métodos de furação à rotação. A utilização de lamas muito densas ou aplicadas a velocidades muito baixas podem levar à penetração excessiva das mesmas no interior dos maciços e dos aquíferos, selar níveis a explorar e dificultar a subida de detritos durante a exploração e assim comprometer o sucesso das operações de limpeza e desenvolvimento posteriores. Por outro lado, a aplicação de lamas de estabilização pouco densas ou aplicadas a velocidades muito elevadas podem não cumprir o objectivo para que são destinadas, ao não criar uma sustentação adequada das paredes do furo, originando o colapso das paredes e o afluxo descontrolado de água no interior do mesmo (Graça, 2012).

Para o controlo da densidade e viscosidade das lamas utilizam-se testes de acordo com normas internacionais (ISO 10414 -1:2008 – Petroleum and natural gas industries – Field testing of drilling fluids – Part 1: Water-based fluids *in* Graça, 2012).

De acordo com a norma anterior, a determinação da densidade, ou peso específico, das lamas é realizado por pesagem das mesmas num recipiente com volumetria conhecida, numa balança de lamas, especificamente destinada para este fim.

O controlo da viscosidade é realizado com recurso ao cone de marsh através de um ensaio de fluidez. O teste baseia-se na velocidade de escoamento de um determinado volume de lamas no referido cone de Marsh. O valor de viscosidade para lamas normais deve apresentar-se entre 34 a 40 s/dm³ no cone enquanto que para lamas densas deverá situar-se entre 50 a 80 s/dm³.

Relativamente à velocidade de ascensão das lamas, Graça (2012) refere que esta deverá ser entre 0,2 a 0,7 m/s, dependendo da dimensão e quantidade dos detritos e da densidade e viscosidade das próprias lamas. Velocidades superiores são desaconselhadas tendo em conta que poderão promover a erosão excessiva das paredes do furo.

Por sua vez a principal diferença entre os sistemas de furação à rotação, reside no circuito efectuado pelas lamas de estabilização.

4.1.2.1. Sistema de circulação directa

No método de furação à rotação pelo sistema de circulação directa, ocorre a rotação da peça de corte (trépano de roletes ou tricône) no terreno e por acção de uma bomba de alta pressão são injetadas as lamas de estabilização pelo interior da cabeça da sonda, saindo no fundo do furo por orifícios da peça de corte.

De seguida, as lamas ascendem pelo espaço compreendido entre a parede exterior das varas de perfuração e as paredes da sondagem, arrastando consigo os detritos da formação perfurada até à superfície, onde ocorre a decantação dos detritos no tanque e a reutilização das mesmas pela sua re-injecção no circuito.

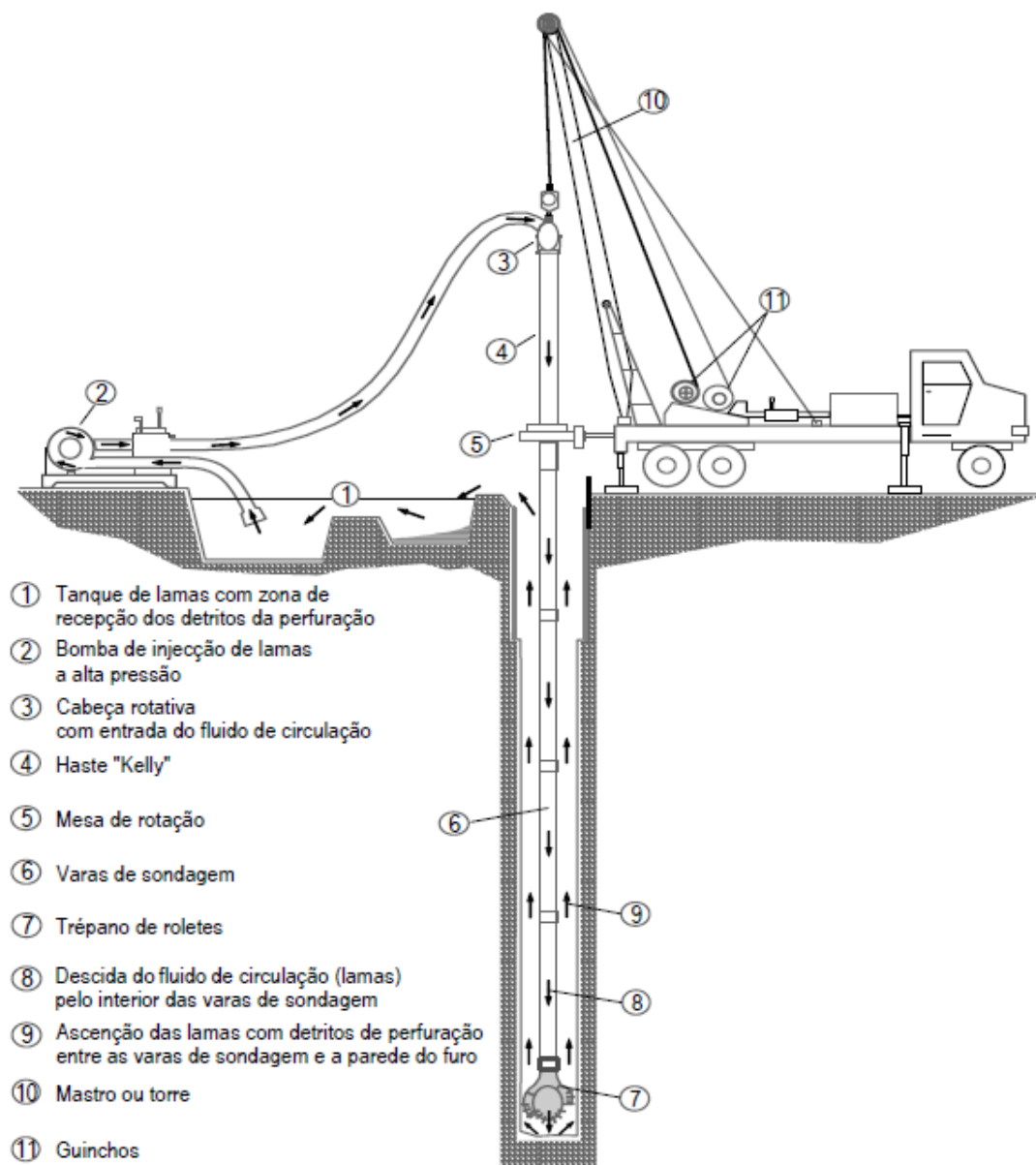


Figura 5 - Sonda de furação à rotação, circulação directa, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).

4.1.2.2. Sistema de circulação inversa

No sistema de furação à rotação por circulação inversa, as lamas são injectadas desde o respectivo tanque para o furo através do espaço compreendido entre a parede exterior das varas de sondagem e as paredes da sondagem. Posteriormente, a ascensão das lamas e dos detritos efectua-se pelo interior da peça de corte (trépano ou trialeta) e varas que constituem a coluna de perfuração, com auxílio de ar comprimido, formando-se uma emulsão ar-lamas de menor densidade. Durante a perfuração, esta ascensão da mistura de lamas e detritos das formações perfuradas tem de ser mantida em equilíbrio com o volume de lamas do tanque.

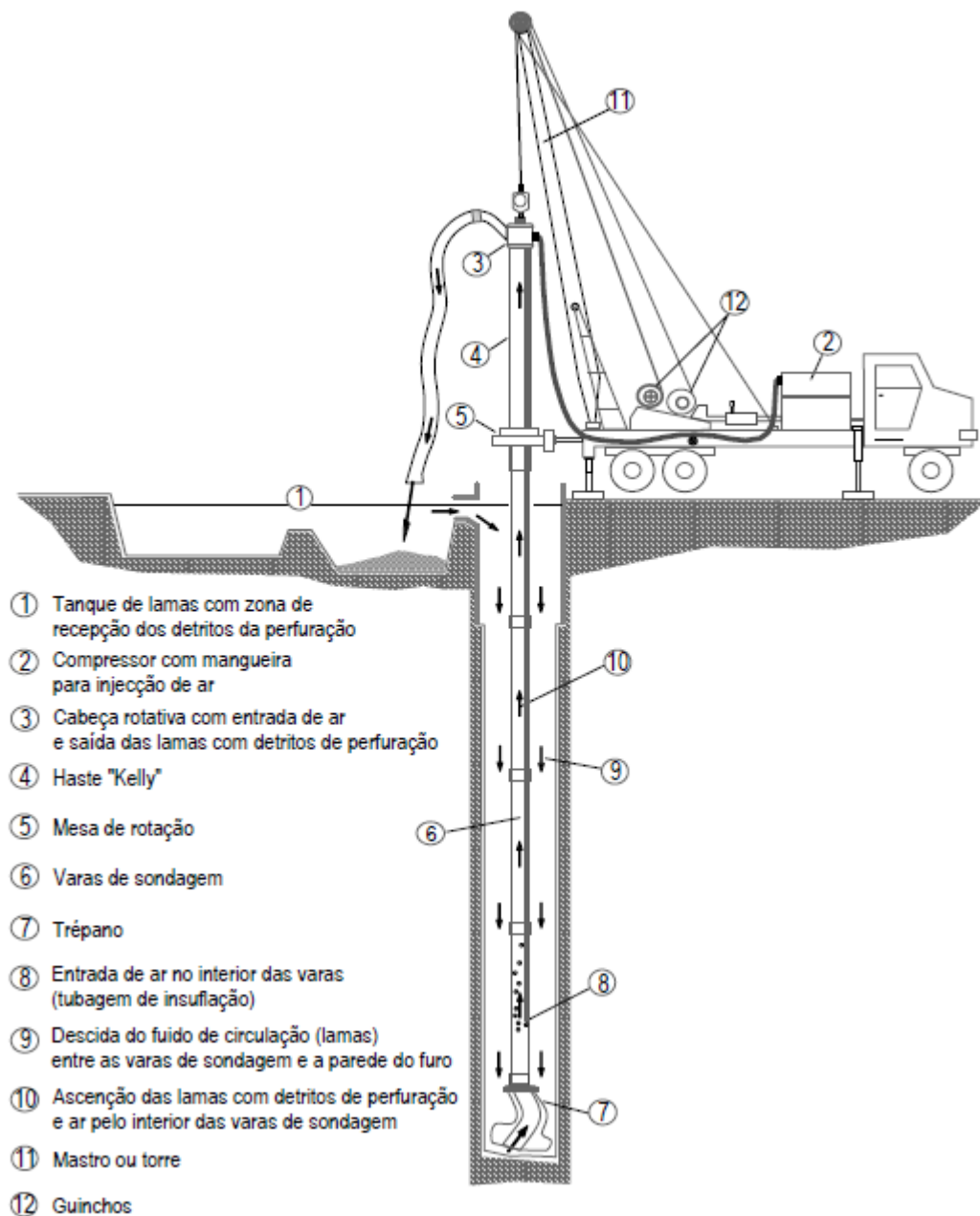


Figura 6 - Sonda de furação à rotação, circulação inversa, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).

4.1.3. Comparação entre métodos

O método de furação por rotopercussão só é eficiente em rochas duras e formações coerentes, cujas paredes não precisem de sustentação durante os trabalhos de furação. Permite a realização de furos de pequeno diâmetro, de forma rápida e económica estando a profundidade de execução limitada pela potência do compressor utilizado.

Por sua vez os métodos de furação à rotação por utilizarem lamas de estabilização, permitem a furação em formações incoerentes, muito fracturadas ou decompostas ou com alternâncias litológicas. No método de furação à rotação, a eleição pelo sistema de circulação directa e inversa reside no facto que o último permite obter uma amostragem de melhor qualidade em relação à circulação directa (minimiza-se o risco de obtenção de amostragem com contaminação cruzada na ascensão pelo furo), a perfuração de furos de grande diâmetro (mesmo com lamas de estabilização menos densas) e que possibilitam por sua vez a instalação de equipamentos de bombagem que permitem extrair caudais elevados. Como desvantagem em relação à circulação directa, o método de circulação inversa necessita de mais meios humanos durante os trabalhos de sondagem e apresenta consumos de combustível e água superiores.

Como referido anteriormente, os trabalhos de furação iniciam-se por vezes pela execução prévia de uma sondagem de pesquisa, para confirmar e/ou completar as informações obtidas nos estudos hidrogeológicos. Caso sejam confirmadas as informações preliminares e/ou se mostre suficientemente produtivo, este furo de pesquisa poderá ser posteriormente transformado em captação. Caso não sejam confirmadas as informações preliminares, este deverá ser selado, com recurso a caldas de cimento de forma a prevenir quer acidentes pessoais quer impedir que o furo executado sirva de veículo de transporte de potenciais contaminantes para o referido aquífero, salvaguardando assim a qualidade da água captada por outras CAS.

4.2. Diâmetros de furação

Durante a execução de um furo de captação pode ser utilizado um diâmetro de furação constante ao longo de toda a coluna ou com uma ou várias reduções de diâmetros em profundidade. Ter-se-á que ter em consideração que os equipamentos de perfuração têm limitações técnicas quanto à relação de diâmetros de perfuração com a profundidade da sua execução (Graça, 2012).

A escolha do diâmetro de perfuração depende em primeira análise do diâmetro da bomba que se irá instalar que depende por sua vez do caudal de exploração e profundidade do nível hidrodinâmico previsto. Caso não se disponham de elementos que permitam avaliar com uma razoável aproximação os caudais espectáveis e a profundidade do nível hidrodinâmico, deverá optar-se por uma sobre-estimativa. A partir do diâmetro da bomba que se espera instalar extrapola-se o diâmetro interno para a coluna de revestimento definitivo do furo na zona da câmara de bombagem (que deverá ser 2" superior ao diâmetro da bomba) e tem-se em conta o espaço anular para a colocação do maciço filtrante (entre 3 a 6") e só por fim o diâmetro de perfuração.

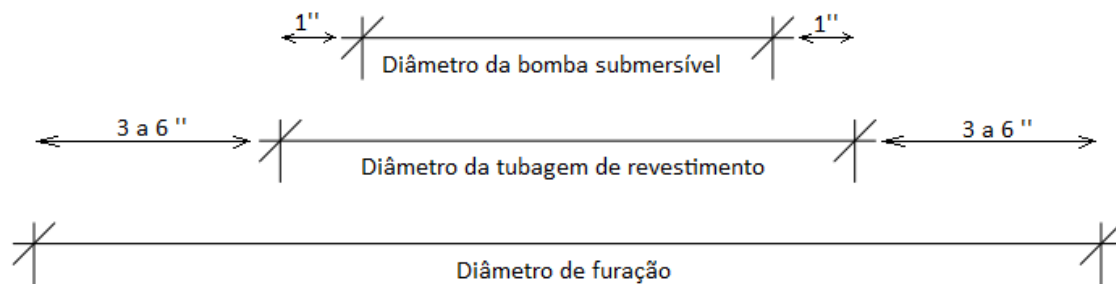


Figura 7 - Diâmetros principais a ter em conta na construção de uma CAS

De acordo com estas condicionantes, a escolha do diâmetro inicial de furação é um factor crucial a ter em conta na construção de captações de água subterrânea.

4.3. Controlo da verticalidade e linearidade da perfuração

Ao longo de um furo existem factores associados às características do maciço rochoso que tendem a originar um desvio do furo em relação à vertical, por vezes muito significativo, assim como a alterar a sua linearidade. Este desvio pode ser originado devido à presença dos seguintes elementos:

- superfícies de estratificação entre camadas com diferente dureza;
- sectores muito fracturados;
- xistosidade das formações;
- zonas de falha, muito tectonizadas;
- ocorrência de blocos não alterados, em maciços alterados e decompostos.

Ao longo das manobras de furação, este controlo é particularmente importante na execução de captações profundas, uma vez que o desvio da verticalidade do furo poderá impedir alcançar os níveis aquíferos desejados, implicar a execução de muitos mais metros de furação até se atingirem os aquíferos pretendidos, levar à obstrução da coluna de varas, à perda de material de furação ou dificultar a instalação posterior da coluna de revestimento. Para averiguar o desvio procede-se à introdução de uma sonda específica no furo, sendo medido o desvio em relação à verticalidade, podendo o mesmo ser corrigido quando detectado numa fase inicial pela utilização, por exemplo, de varas de sondagem com centralizadores.

4.4. Amostragem durante a furação

Durante as manobras de furação é conveniente a amostragem dos terrenos atravessados através da recolha dos detritos de furação, a intervalos de profundidade regulares, à boca do furo (no caso de se utilizar a rotopercussão) ou ao retorno das lamas aos tanques de decantação (caso se utilizem os métodos de furação à rotação). A amostragem tem como objectivos definir os níveis a captar e o consequente posicionamento dos tubos-ralo a intercalarna na coluna de revestimento definitivo, identificar intervalos de profundidades em que seja conveniente a aplicação de isolamentos intercalares e a escolha do tipo de maciço filtrante a aplicar.

Relativamente aos métodos de furação abordados neste trabalho definem-se por serem todos destrutivos. Na rotopercussão a amostragem está limitada a fragmentos de rocha de pequena dimensão (*cuttings*). Relativamente aos métodos de furação à rotação estes permitem a obtenção de amostras de melhor qualidade face ao método anterior, sendo que o sistema de circulação inversa permite uma amostragem de melhor qualidade face ao sistema de circulação directa.

Caso a amostras obtidas não sejam de qualidade ou suscitem dúvidas quanto ao intervalo de profundidade de proveniência, em complemento à amostragem realizada deve recorrer-se a técnicas de prospecção geofísica (diagrfias) de forma a atingir os objectivos anteriores.

4.5. Diagrfias

As diagrfias, consistem nos registos obtidos na aplicação de diferentes técnicas de prospecção geofísica resultantes da descida e/ou subida de uma sonda específica ao longo da coluna perfurada, procedendo-se à aquisição, em contínuo, de determinados parâmetros geofísicos (potencial espontâneo, resistividade eléctrica ou radiação gama natural) das formações atravessadas:

- i. Potencial espontâneo – medição da diferença de voltagem entre um eléctrodo colocado à superfície, nas proximidades da boca do furo, e outro descido ao longo do furo. A saída de resultados por norma está organizada de forma a obter um registo dos desvios em relação à “linha do xisto” (que representa estratos impermeáveis) e a linha à sua esquerda, a “linha da areia” (que representa estratos permeáveis);
- ii. Resistividade eléctrica - medição da diferença de potencial eléctrico após a aplicação de uma corrente alternada entre um eléctrodo colocado à superfície e outro baixado ao furo. O valor de potencial registado varia de acordo com a maior ou menor a percentagem de água na formação (sendo as variações devidas ao teor de sais dissolvidos na água e porosidade das formações);
- iii. Radiação gama natural - consiste na contagem da emissão de raios gama resultante da desintegração de alguns núcleos de átomos (urânio, tório, potássio) dos minerais das formações atravessadas. É útil na separação dos níveis mais argilosos, que por norma apresentam maior quantidade desses elementos.

Os dados obtidos na realização destes métodos de prospecção indirecta assumem particular importância na construção da captação quando a amostragem obtida é de má qualidade ou o

intervalo de profundidade difícil de avaliar, constituindo assim ferramentas importantes para a definição das profundidades dos níveis/horizontes mais produtivos, nos quais se devem posicionar, idealmente, os tubos-ralo na tubagem de revestimento.

4.6. Coluna de revestimento

O revestimento de um furo de CAS pode ser realizado por diferentes tipos de materiais, destacando-se, os mais recomendados para esse fim, os tubos em PVC ou em aço inoxidável (aço inox AISI 304 ou 316), sendo que a escolha do material deve ser feita tendo em conta o perfil hidroquímico das águas a captar.

De assinalar ainda que em certos casos (ainda que raros) opta-se por não instalar uma coluna de revestimento de forma parcial ou total ao longo do furo, ficando o mesmo parcialmente ou totalmente em “open-hole”.

Tendo em conta o material mais adequado para cada caso, encontram-se disponíveis tubos em troços com diferentes comprimentos, diâmetros, espessura de parede (diferente resistência mecânica) e uniões. Na definição e selecção da coluna de revestimento definitivo deve ser encontrada uma solução de compromisso/equilíbrio entre a sua qualidade/durabilidade.

Os tubos em PVC a utilizar neste tipo de obra devem ser os fabricados para esse fim. Graça (2012) adverte que os tubos em por norma destinados à construção de drenagens e condutas correntes não apresentam as características de resistência minimamente adequadas às pressões a que as paredes das tubagens de revestimento dos furos de captação são solicitadas. Relativamente à tubagem em inox, os tubos em PVC apresentam:

- i. custo muito inferior ao das tubagens em aço inox;
- ii. manuseamento e transporte mais fácil devido ao menor peso;
- iii. construção da coluna de revestimento de forma mais fácil e rápida;
- iv. não é susceptível a fenómenos de oxidação ou corrosão nem serve de alimento ou fonte de energia a ferro bactérias;

Os tubos em aço inox AISI 304/316¹ definem-se por serem tubos em aço inoxidáveis austeníticos, ou seja, têm na sua composição cromo e níquel em concentrações superiores a 7%, que lhes confere resistência particular à corrosão (Graça, 2012). Relativamente aos tubos em PVC, a tubagem em aço inox apresenta:

- i. resistência mecânica superior ao PVC, permitindo a sua aplicação a maiores profundidades;
- ii. permite a execução de furos com menores diâmetros uma vez que para o mesmo cenário e profundidades, a espessura da tubagem de revestimento em aço inox é bastante menor do que a de uma tubagem em PVC;

O diâmetro da tubagem de revestimento pode ser igual para toda a coluna ou apresentar uma ou várias reduções sucessivas em profundidade. Neste último caso, o revestimento é do tipo

¹a versão 316 do aço AISI apresenta ainda cerca de 2,5% de molibdénio na sua composição, que incute uma maior resistência em ambientes marinhos, ou águas subterrâneas muito mineralizadas e agressivas (Graça, 2012).

telescópico, sendo a ligação entre os troços de tubagem com diferentes diâmetros feita através de cones de redução.

Os diâmetros da tubagem de revestimento estão, obviamente, relacionados com os diâmetros de perfuração utilizada, dependendo ambos do caudal de exploração previsto. Em regra, adopta-se que o diâmetro da tubagem deverá corresponder ao diâmetro de perfuração ao qual se subtraem 6 a 12" para a construção posterior do maciço filtrante (entre a tubagem instalada e as paredes do furo).

A selecção do diâmetro da tubagem de revestimento deverá ter em consideração as dimensões do equipamento de bombagem, permitindo que este seja instalado com facilidade no interior da captação e igualmente removido com facilidade em caso de avaria ou necessidade de manutenção da bomba e que opere com eficiência. Pretende-se evitar o choque da bomba, quer no arranque quer na paragem de funcionamento, com o revestimento.

O diâmetro da tubagem de revestimento na zona da câmara de bombagem tem de ser suficiente para acomodar o conjunto da bomba e respectivos acessórios. Nessa zona a tubagem deverá ter em regra um diâmetro que deve ser pelo menos 2" superior ao diâmetro da bomba.

Relativamente às uniões entre os diferentes troços de tubagem estes podem ser do tipo roscadas, rebitadas ou soldadas. No caso da tubagem em PVC, considera-se preferível que as ligações sejam do tipo roscado, em vez dos frequentemente utilizados rebites. Contudo, caso se opte por uniões rebitadas, devem usar-se sempre rebites inox. Relativamente à tubagem em aço, caso se decida por uniões soldadas em vez de roscadas, a liga de soldadura deve ser igual à liga metálica da tubagem, devendo os trabalhos ser realizados por equipas especializadas nessa tarefa.

Na coluna de revestimento, há ainda que definir os tubos-ralo. Estes correspondem a tubos com aberturas, *slots*, rasgos, ranhuras ou fendas existentes na parede do tubo pelo qual se dá a entrada de água na CAS.

Deve ser dada uma atenção particular aos tubos-ralo, pois o rendimento da captação depende de uma correcta selecção do seu tipo e posicionamento. Além das características que são comuns aos tubos cegos ou não abertos (em termos de composição, diâmetro e espessura da tubagem), há ainda outras, a ter em conta, tais como a área aberta total, o tamanho e a geometria das ranhuras.

Os tubos-ralo mais utilizados, de acordo com o tipo de abertura/rasgo/ranhura/fenda, são:

- i. Do tipo ranhurado (de fenda vertical, oblíqua ou horizontal, sendo esta última a mais comum);
- ii. De fenda contínua;
- iii. De estrutura em ponte;

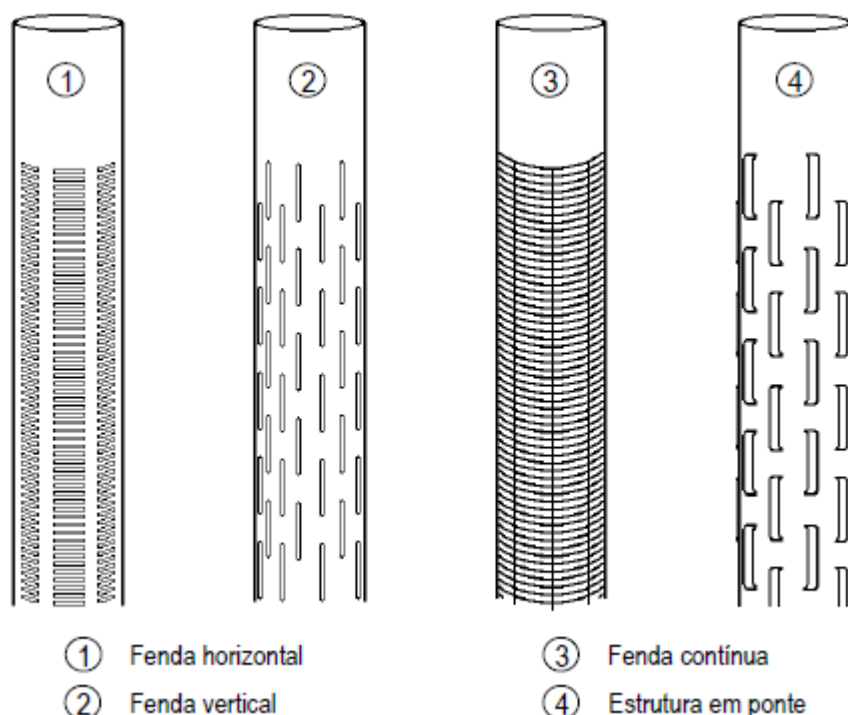


Figura 8 - Principais tipos de ranhura dos tubos-ralo, retirado do Manual de Boas Práticas para a Execução de Exploração de Furos de CAS, IPQ (2012).

O tamanho das aberturas dos tubos-ralo deve ser escolhido em função da granulometria do material que constitui a formação aquífera e da granulometria do maciço filtrante.

A área aberta dos tubos-ralo e o seu comprimento deverão ser selecionados de forma a assegurar a obtenção do máximo caudal de entrada de água na captação em regime laminar (velocidade de entrada $\leq 3 \text{ cm/s}$ (Todd, 2005)), com retenção das partículas finas.

Devem ser posicionados em frente dos níveis/horizontes mais produtivos (de maior condutividade hidráulica, definidas idealmente após a realização de uma interpretação conjunta da amostragem realizada e de diagrfias), cuja água tenha a qualidade pretendida para o fim a que se destina e sempre abaixo do nível hidrodinâmico previsto (uma vez que a maioria dos contaminantes é menos denso que a água e as aberturas sofrem uma deterioração mais rápida quando não se encontram permanentemente submersas).

Relativamente à extensão dos tubos-ralo (zona filtrante) em relação à espessura do aquífero há que considerar três situações na construção da coluna de revestimento do furo:

- i. se a extensão da zona de tubos-ralo abarca a totalidade da espessura do aquífero, o furo denomina-se totalmente filtrante ou completo;
- ii. se extensão da zona de tubos-ralo abarca apenas uma parte do aquífero, o furo denomina-se incompleto;
- iii. se o furo é incompleto mas a zona de tubos-ralo tem início na base ou tecto do aquífero, o furo denomina-se parcialmente filtrante.

4.7. Maciço filtrante

Entre a tubagem de revestimento e o espaço anular deve ser construído um maciço filtrante, dimensionado de forma a cumprir as seguintes funções:

- i. Criar uma zona de porosidade e condutividade hidráulica superior à do aquífero, em torno da coluna de revestimento, para facilitar a entrada de água na captação;
- ii. Implementar um filtro que minimize a passagem para dentro da captação de areias finas, siltes ou argilas que podem colmatá-la e provocar avarias na bomba, por vezes irremediáveis, durante a fase de exploração;
- iii. Amortecer as vibrações originadas pela bomba nos momentos de arranque ou de paragem;
- iv. Envolver a coluna de revestimento, protegendo-a e conferindo-lhe resistência;
- v. Proporcionar um bom suporte ao material isolante que reveste o furo em determinadas profundidades e serve de proteção contra contaminações superficiais ou de níveis aquíferos cuja exploração não é conveniente.

Este deverá ter entre 3" a 6" de espessura por banda, não sendo recomendada a utilização de espessuras inferiores ou superiores a este intervalo, pois filtros pouco espessos podem não filtrar correctamente e muito espessos podem dificultar a entrada de água na captação (contribuem para as perdas de carga).

Quanto à natureza dos materiais a aplicar, quando a granulometria dos terrenos atravessados nos níveis aquíferos é grosseira e extensa, podem ser utilizados os materiais da formação provenientes desses níveis, sendo o arraste das fracções mais finas feita em fase de desenvolvimento, constituindo assim um maciço natural. A aferição da aptidão dos materiais provenientes desses níveis para a utilização na construção do maciço filtrante é feita com recurso a um ensaio granulométrico e a consequente análise das curvas obtidas.

Se os detritos do furo dos níveis aquíferos não cumprirem os requisitos anteriores, opta-se pela construção de um maciço filtrante artificial. Este maciço deve ser construído por seixo de natureza siliciosa, devidamente lavado, calibrado e com esfericidade e arredondamento elevados.

O seixo que constitui o maciço filtrante, seja natural ou artificial, deve ser colocado uniformemente no espaço anular existente entre a coluna de revestimento definitivo e as paredes da perfuração e ao longo da zona de captação. Em cada troço de tubo-ralo, o maciço filtrante deve exceder ligeiramente o seu comprimento, na base e no topo, de forma a acautelar o seu abatimento e o possível arraste de materiais finos que possam contribuir para a colmatção dos ralos.

A colocação do seixo do maciço filtrante deve ser feita de forma lenta e constante em torno da coluna de revestimento instalada previamente para que este fique perfeitamente acamado e contínuo. Quando colocado de forma rápida, pode suceder que a continuidade seja afectada por zonas sem seixo, colocando em perigo a resistência do revestimento. O volume de seixo a aplicar deverá ser sempre igual ou superior à diferença entre o volume cilíndrico correspondente à perfuração subtraído ao volume cilíndrico da coluna de revestimento no troço definido para a colocação do maciço filtrante. Em algumas situações é natural que o

volume teórico assim calculado seja largamente ultrapassado pelo volume efectivo de seixo necessário, o que significa, dadas as características das formações geológicas atravessadas, que o diâmetro nominal da perfuração desenvolveu lateralmente mais espaço ou que podem existir níveis de perda (cavidades ao longo do furo). Já quando o volume de seixo colocado é inferior àquele volume teórico, significa que pode ter ocorrido o colapso das paredes das formações perfuradas ou qualquer outro fenómeno, como a expansão de alguns dos materiais litológicos atravessados.

4.8. Isolamentos intercalares

Por vezes ao longo de uma perfuração, podem ser atravessados dois ou mais aquíferos com águas com perfil hidroquímico distinto, como tal torna-se necessário proceder ao isolamento desses níveis, recorrendo à utilização de argilas expansivas ou à injeção de caldas de cimento.

Estes isolamentos são aplicados de forma intercalada com a construção do maciço filtrante com o objectivo de criar um isolamento das camadas captadas na zona anular, de forma a prevenir a infiltração de águas provenientes de níveis superiores que possam estar contaminadas.

Na aplicação de isolamentos à base de caldas de cimento, Graça (2012) adverte que caso se tenha instalado uma coluna de revestimento do furo com tubagem em PVC, é preciso ter em conta a espessura da tubagem nos sectores a isolar, uma vez que a cura da calda de cimento pode em certos casos, nomeadamente em tubos de baixa espessura, levar à deformação da referida tubagem.

4.9. Limpeza e desenvolvimento

Uma vez terminada a construção da captação, seguem-se as operações de limpeza e desenvolvimento da mesma. Uma vez que os métodos de perfuração promovem a alteração das características hidráulicas das formações aquíferas na área adjacente à captação, torna-se necessário proceder a um conjunto de operações com o objectivo de:

- Restabelecer, na envolvente da captação, as propriedades hidráulicas iniciais do aquífero que foram alteradas pelas operações de perfuração durante a execução do furo;
- Aumentar a eficiência da captação, reduzindo as perdas de carga resultantes da circulação da água até ao furo, quer por remoção de fluídos (lamas) e de detritos da perfuração, quer por, eliminação de materiais finos da formação aquífera. Com esta eliminação de materiais finos pretende-se evitar o seu arrastamento posterior para o interior da captação, sendo minimizados, durante a fase de exploração, a colmatação dos ralos, danos na bomba e nas condutas de distribuição de água.

Os métodos de limpeza e desenvolvimento dividem-se em métodos hidromecânicos e químicos, sendo que a aplicação de cada um irá depender do tipo de captação e formações atravessadas.

Os métodos hidromecânicos consistem em criar fluxos de água na captação superiores aos naturais. Como exemplo destes métodos enumeram-se:

- i. as pistonagens - realização de sucções a certas profundidades na captação;
- ii. a sobrebombeagem - extracção de um caudal elevado, superior ao da fase de exploração;
- iii. “air-lift” - a inserção de um conjunto de varas de forma a permitir a introdução de ar-comprimido no furo;
- iv. “jetting” – a introdução de um jacto de água a alta pressão.

Os métodos químicos consistem na utilização de agentes químicos que desfloculam ou desagregam quer as lamas de perfuração, quer as frações finas que obstruem as fissuras/fracturas da formação aquífera em torno da captação. Os dispersantes mais utilizados são compostos à base de fosfatos de sódio, nomeadamente o hexa-metafosfato de sódio, o tetra-pirofosfato de sódio e o tri-polifosfato de sódio. A sua aplicação deverá incidir preferencialmente ao nível dos ralos pelo que a sua aplicação no furo não deverá consistir na sua introdução à boca do furo e esperar que se propaguem até à base da captação, devendo-se por isso proceder à instalação de uma coluna de varas para a sua correcta aplicação. Após a aplicação de um método de desenvolvimento químico a operação deve ser complementada pela utilização de um método hidromecânico (Graça, 2012).

4.10. Isolamento sanitário

A realização desta operação destina-se a evitar a contaminação dos aquíferos atravessados pelo furo, por substâncias poluentes (fertilizantes, produtos fitofarmacêuticos, efluentes humanos ou animais, entre outros) que se encontram frequentemente no solo e que tendem a infiltrar-se nos furos desprotegidos a partir da superfície. Consiste em preencher o espaço entre o topo do maciço filtrante com argilas até próximo da superfície do terreno sendo que nos últimos metros este deve ser feito utilizando caldas de cimento (acautelando assim a dissecação e retracção sofrida pelos materiais de natureza argilosa com a secagem).

5. Exploração

5.1. Ensaios de caudal

Os ensaios de caudal visam conhecer os parâmetros hidráulicos do aquífero e/ou captação e assim fornecer informações relativas à escolha do equipamento de bombagem a instalar bem como a definição de um plano de exploração do recurso.

Resumidamente, os ensaios de caudal consistem na bombagem de uma captação e a medição dos rebaixamentos na captação e em piezômetros a distâncias conhecidas, e a utilização dos rebaixamentos medidos, em equações de fluxo subterrâneo para o cálculo dos parâmetros hidráulicos do aquífero/captação (Kruseman e Ridder, 1994). Sendo que os dois parâmetros fundamentais a avaliar são a transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S).

A transmissividade (T), que corresponde à capacidade que um determinado meio tem em ceder água, resulta da equação:

$$T = k * b$$

Onde:

k = condutividade hidráulica (parâmetro intrínseco do meio, corresponde ao volume de água que atravessa o meio por unidade de tempo)

b = espessura unitária saturada de formação aquífera

O coeficiente de armazenamento (S) corresponde ao volume de água cedido por uma coluna de aquífero de área unitária quando o nível piezométrico decresce de uma unidade e resulta da equação:

$$S = Ss * b$$

Sendo que b corresponde à espessura do aquífero e Ss ao armazenamento específico, calculado pela equação:

$$Ss = pg(\alpha + n\beta)$$

Onde:

p = massa específica da água

g = aceleração da gravidade

α = compressibilidade do meio poroso

n = porosidade

β = compressibilidade da água

O bombeamento de um furo provoca o rebaixamento do nível de água tanto no furo como na envolvente do mesmo. Num furo em repouso, em que se inicie o bombeamento, à descida do

nível piezométrico, que corresponde à descida do nível hidrostático (NHE) para o nível hidrodinâmico (NHD), define-se como rebaixamento (s):

$$s = \text{NHE} - \text{NHD}$$

O rebaixamento é maior no interior do furo e vai-se dissipando à medida que se afasta do mesmo. Em condições ideais o rebaixamento em torno do furo assume a forma de um cone, o denominado cone de rebaixamento.

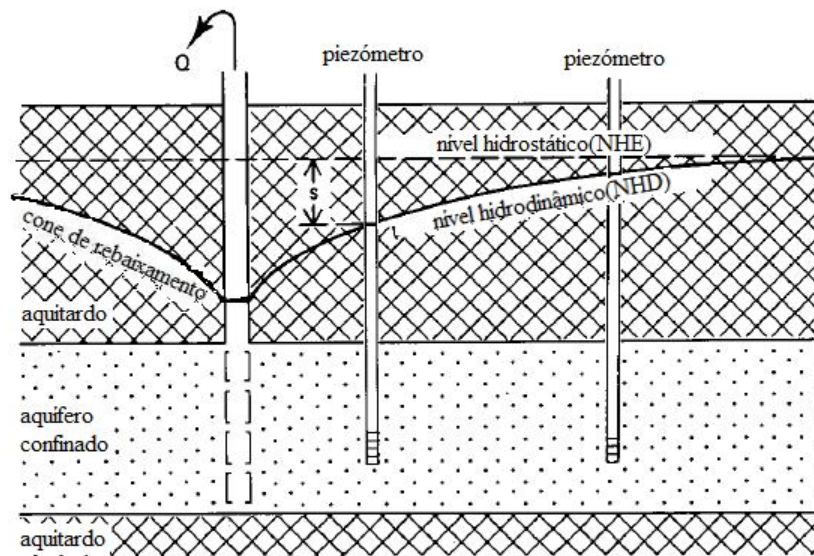


Figura 9 - Representação do cone de rebaixamento, adaptado de Kruseman e Ridder (1994).

Quanto ao fluxo de exploração este pode ser:

- i. Permanente ou em equilíbrio - designa-se por fluxo em regime permanente ou em equilíbrio quando o caudal extraído pelo furo é compensado por recarga proveniente de uma fonte exterior (como por exemplo, um rio, um lago ou um aquífero);
- ii. Variável ou transitório – designa-se por fluxo em regime variável ou transitório quando o caudal extraído não é compensado por recarga proveniente de uma fonte externa, o que implica que a água extraída provém unicamente do coeficiente de armazenamento prosseguindo o rebaixamento e o aumento do raio de influência em função do tempo. O regime variável prossegue até se atingir o regime permanente.

Podem ser executados dois tipos de ensaios que dependem da caracterização que se pretende realizar:

- o ensaio de bombeamento para caracterização do conjunto aquífero+captação (em termos de geometria, transmissividade e coeficiente de armazenamento);
- o ensaio de caudal escalonado para a caracterização da captação (em termos de perdas de carga, eficiência, caudais de exploração e aproximação do valor de transmissividade).

Idealmente, para que se produzam resultados fidedignos, é necessário que o ensaio seja realizado com os seguintes equipamentos e precauções:

- i. uma bomba submersível que permita manter o caudal constante bem como variações instantaneas do mesmo;
- ii. um caudalímetro ou outro dispositivo que permita medir com exactidão à boca do furo bombeado o caudal extraído;
- iii. uma sonda que permita registar os rebaixamentos de acordo com os intervalos pré-definidos de observação;
- iv. um sistema que desvie a água extraída durante o ensaio para uma distância suficiente de forma a evitar que esta retorne ao aquífero durante o ensaio;
- v. a ausência de captações em funcionamento no mesmo aquífero a testar.

Relativamente aos intervalos de observação, de acordo com Kruseman e Ridder (1994) as medições devem ser frequentes nas primeiras duas horas de ensaio, porque inicialmente os níveis de água descem rapidamente. Posteriormente, os intervalos de mediação podem ser gradualmente alargados. Os mesmos autores propõem que os intervalos de medição durante o ensaio de caudal sejam de: 0,5 minutos dos 0 aos 5 minutos; 5 minutos dos 5 aos 60 minutos; 20 minutos dos 60 aos 120 minutos e 60 minutos dos 120 minutos até finalizar-se o ensaio. Quanto à duração do ensaio, os autores referem que esta varia em função do tipo de aquífero ensaiado e da exactidão necessária para os valores a obter.

Para interpretação dos rebaixamentos medidos em função dos caudais de extracção utilizados no ensaio, existem actualmente vários programas informáticos que incorporam diversos métodos de análise e que cuja aplicabilidade depende:

- i. do modo em que se realizou o ensaio (se de bombagem ou escalonado)
- ii. do tipo de aquífero (estrutura, comportamento, espessura)
- iii. do regime de exploração (permanente ou variável)
- iv. do tipo de captação (em termos de diâmetro, espessura penetrante no aquífero)

5.1.1 Ensaio de bombeamento

No ensaio para a caracterização da captação e aquífero (em termos de geometria, transmissividade e coeficiente de armazenamento), o denominado ensaio de bombeamento, utiliza-se a captação como centro de operações, sendo os rebaixamentos medidos quer no furo de captação bem como em um ou mais piezómetros a uma distância máxima dentro do raio de influência do furo a testar. Os parâmetros hidráulicos são determinados a partir do caudal bombeado, dos rebaixamentos medidos e das respectivas distâncias, através de fórmulas apropriadas (Kruseman e Ridder, 1994). Apesar de ser o único método que permite obter dados para o cálculo dos parâmetros hidráulicos com exactidão, este tipo de ensaio por implicar a realização de medições quer na captação bombeada quer no(s) piezómetro(s) próximos, torna o processo de certa forma moroso e dispendioso, não constituindo o método de eleição para realizar a caracterização hidráulica de uma captação/aquífero.

Para fluxos em regime permanente:

Para aquíferos confinados, utiliza-se o método de Thiem (1906) - representam-se em papel semilogarítmico os rebaixamentos observados em função das distâncias aos piezômetros e determina-se a variação do rebaixamento (Δs) correspondente a um ciclo logarítmico. O valor da transmissividade é calculado através da equação:

$$T = \frac{2,3 * Q}{2\pi * \Delta s}$$

Onde:

Q = caudal

Δs = variação do rebaixamento correspondente a um ciclo logarítmico

Em aquíferos livres o rebaixamento tem de ser corrigido:

$$s' = s - \frac{s^2}{2h_0}$$

Onde:

s – corresponde ao rebaixamento observado

s' - corresponde ao rebaixamento corrigido

h_0 – espessura saturada inicial

Para fluxos em regime variável:

Para aquíferos confinados utilizam-se os métodos de Theis (1935) e Jacob (1946) (*in* Kruseman e Ridder, 1994), assumindo-se que:

- i. O aquífero é homogêneo, isotrópico e aparentemente infinito;
- ii. O furo é de diâmetro nulo e atravessa completamente a formação permeável;
- iii. O caudal é constante;
- iv. Não existem recargas exteriores;
- v. A água bombeada produz, de imediato, o rebaixamento do nível no furo e não volta a entrar para o aquífero;
- vi. O fluxo de água é radial e não tem componente vertical.

Para a interpretação dos rebaixamentos de acordo com o método de Theis (1935 *in* Kruseman e Ridder, 1994), traça-se em papel logarítmico, a curva de campo de rebaixamentos observados em relação ao tempo, à qual se faz o ajuste (tendo em conta a distância ao piezômetro de observação) pela sobreposição da curva teórica de Theis, obtendo-se os pares de valores para $W(u)$ e $1/u$.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u), u = \frac{r^2 S}{4Tt}; T = \frac{QW(u)}{4\pi s}, S = \frac{4Tt}{r^2 1/u}$$

Onde:

s = rebaixamentos

Q = caudal

T = transmissividade

W(u) = função do poço que varia com o valor de u, sendo uma função auxiliar tabelada

S = coeficiente de armazenamento

r = distância do furo ao piezômetro

t = tempo

Por sua vez no método de Jacob (1946), uma simplificação do método anterior, representam-se em papel logarítmico, os rebaixamentos em função do tempo (neste método, o cálculo do coeficiente de armazenamento não pode ser realizado utilizando os dados do poço de bombagem):

$$T = \frac{2,3Q}{4\pi\Delta s}, S = \frac{2,25T t_0}{r^2}$$

Onde:

T = transmissividade

Q = caudal

Δs = variação de rebaixamento correspondente a um ciclo logarítmico

r = distância do furo ao piezômetro

t_0 = tempo correspondente a um rebaixamento igual a 0

Para aquíferos semiconfinados utiliza-se o método de Walton (1962 in Kruseman e Ridder, 1994), traça-se em papel logarítmico, os rebaixamentos em função do tempo com o mesmo ciclo que as curvas teóricas de Walton, a partir das quais se faz o ajuste pela curva de maior coincidência obtendo-se o valor de r/B. De seguida retira-se as coordenadas de um ponto nas duas folhas logarítmicas [w(r/B) e 1/u] e [s e t].

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B), u = \frac{r^2 S}{4Tt}; T = \frac{QW(u, r/B)}{4\pi s}, S = \frac{4Tt}{r^2 1/u}$$

Onde:

s = rebaixamentos

Q = caudal

T = transmissividade

W(u) = função do furo varia com o valor de u, sendo uma função auxiliar tabelada

S = coeficiente de armazenamento

r = distância do furo ao piezômetro

t = tempo

Para furos de grande diâmetro em aquíferos confinados utiliza-se o método de Papadopolos-Cooper (1967 *in* Kruseman e Ridder, 1994), uma vez que se o furo é de grande diâmetro o método de Theis não é aplicável porque há armazenamento apreciável de água no furo.

Assume-se que:

- i. Não existem recargas exteriores;
- ii. Aquífero homogêneo e isótropo em relação a K;
- iii. O aquífero é infinito;
- iv. O diâmetro do furo não pode ser considerado muito pequeno, pelo que o armazenamento no furo não pode ser negligenciado;
- v. O furo atravessa completamente a formação permeável;
- vi. A água que se bombeia produz uma descida imediata do nível e não volta a introduzir-se no aquífero.

Projectam-se os valores do ensaio em papel bilogarítmico com ciclo igual ao das curvas de Papadopolos-Cooper, obtem-se a coincidência entre a curva de campo e a curva de Papadopolos-Cooper e retiram-se os valores de: α (curva com melhor coincidência), s, t, $F(u_p; \alpha)$ e $1/u_p$.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(up; \alpha) , up = \frac{rp^2 S}{4Tt} , \alpha = S \frac{rp^2}{ra^2}$$

Onde:

s = rebaixamento

Q = caudal

T = transmissividade

rp = raio do furo na zona de entrada de água

ra = raio do furo na zona fechada

5.1.2 Ensaio de caudal escalonado

No ensaio de caracterização da captação, o denominado ensaio de caudal escalonado ou variável, procede-se ao bombeamento da captação e realiza-se a medição dos rebaixamentos no próprio furo de captação. Neste ensaio, os parâmetros hidrodinâmicos são estimados a partir dos rebaixamentos observados durante o ensaio, que resultam das perdas de carga de entrada de água na captação (Jacob 1947 in Kruseman e Ridder (1994)). Para a validade do ensaio deve considerar-se a realização de 4 escalões de bombeamento, de aproximada duração e com um incremento de caudal de extracção entre cada escalão.

Segundo Jacob (1947) os rebaixamentos observados na captação são devidos a:

$$s_w = BQ + CQ^2$$

Onde:

s_w - rebaixamento observado na captação

$B(Q)$ - perdas de carga lineares

$C(Q)^2$ - perdas de carga quadráticas

Q – caudal de extracção

Para interpretar o ensaio, utiliza-se o método de Hantush-Bierschenk (1964 in Kruseman e Ridder (1994)), que engloba as seguintes etapas:

- a) utilizando os dados do ensaio (rebaixamentos medidos em função do tempo para cada escalão de bombeamento), projectam-se num gráfico (semi-log) de rebaixamentos medidos vs tempo e determina-se as variações de rebaixamento (s) e de caudal (Q) para cada escalão ensaiado;
- b) de seguida calculam-se, os valores acumulados de (s) e (Q);
- c) procede-se à divisão dos valores acumulados de (s) e (Q) para cada escalão, obtendo-se assim os valores de rebaixamento específico (s_{ac}/Q_{ac});
- d) posteriormente, os valores de rebaixamento específico são representados num gráfico aritmético de rebaixamentos específicos acumulados vs valores de caudal acumulados para cada escalão;
- e) com os pontos assim obtidos traça-se a recta mais provável. O declive desta recta corresponde ao parâmetro (C) para o cálculo do valor das perdas de carga quadráticas (CQ^2) e a intersecção da recta com o eixo das ordenadas corresponde ao parâmetro (B) a utilizar para o cálculo do valor das perdas de carga lineares (BQ).

Com base nos valores de perdas de carga lineares (BQ) e quadráticas (CQ^2) é possível calcular a eficiência da captação em função do caudal de extracção (Kruseman e Ridder, 1994):

$$EFC = [BQ / (BQ + CQ^2)] * 100$$

Considera-se que uma CAS possui uma eficiência óptima quando esta apresenta um valor superior a 90% (corresponde ao limite do valor de caudal óptimo de exploração) e uma eficiência aceitável quando apresenta um valor entre 90% a 75% (corresponde ao valor de caudal máximo de exploração, não sendo recomendada a utilização de caudais de exploração abaixo de uma eficiência de 75% pois o fluxo em regime laminar poderá não ser assegurado, promovendo-se assim o regime turbulento em redor da captação, o arraste de materiais finos que podem dar origem à colmatção dos ralos, a danos na bomba submersível, entre outros problemas).

A definição do caudal ideal de exploração (Q_e) é realizada pela construção de um gráfico de curvas características da captação, em que se representam os valores de perdas de carga lineares (BQ) e rebaixamento ($BQ+CQ^2$) em função dos caudais teóricos de exploração considerados. O valor de caudal ideal de exploração corresponde aproximadamente ao caudal em que se verifica a separação das duas curvas representadas.

Para a estimação do valor de transmissividade (T) através de um ensaio de caudal escalonado utiliza-se a fórmula de Logan (1964):

$$T = 1,22 * q$$

Onde:

q é o caudal específico, que corresponde à razão entre o caudal ideal de exploração (Q_e) e o respectivo rebaixamento específico (s_p).

5.2. Colheita de amostras de água

Para além da medição de parâmetros físico-químicos *in situ* como a temperatura da água, o pH e a condutividade eléctrica, realizados quer durante ou após a construção da captação; conforme a finalidade da água captada é conveniente a realização periódica de recolha de amostras de água e a sua análise laboratorial. No caso das captações de água destinadas ao abastecimento público ou industrial a medida está consagrada no Decreto-Lei nº 238/94 de 1 de Agosto, onde são definidos os parâmetros a avaliar, VMA's, VMR's, bem como a periodicidade das análises.

5.3. Relatório hidrogeológico da captação

De acordo com o n.º 1 do artigo 14.º do Decreto-Lei n.º 84/2011, de 20 de Junho, o empreiteiro, está obrigado a elaborar um relatório técnico para cada trabalho de pesquisa de águas subterrâneas realizado, que deverá ser obrigatoriamente subscrito e assinado pelo director de obra devendo ser entregue ao cliente no prazo máximo de 60 dias contados da conclusão dos trabalhos de pesquisa. Deste relatório devem fazer parte os seguintes aspectos:

a) Localização da obra de captação, com indicação das coordenadas geográficas;

- b) Indicação do número do processo de licenciamento;
- c) Datas de início e conclusão dos trabalhos;
- d) Profundidades, diâmetros e métodos de perfuração utilizados;
- e) Profundidades, diâmetros e natureza dos materiais de revestimento utilizados;
- f) Tipos, posição e material dos tubos ralos;
- g) Profundidades dos níveis estático e dinâmico e respectivos caudais;
- h) Profundidade aconselhada para a colocação do sistema de extracção;
- i) Posição, granulometria e natureza do maciço filtrante e outros preenchimentos do espaço anular;
- j) Procedimento do ensaio de desenvolvimento com indicação do número de horas de ensaio;
- l) Caudal e regime de exploração recomendados;
- m) Análise química e bacteriológica da água captada;
- n) Tabela dos valores medidos nos ensaios de caudal e determinação dos parâmetros hidráulicos;
- o) Observações relativas aos cuidados a tomar na exploração da captação a fim de evitar o envelhecimento prematuro da obra;
- p) Peças desenhadas relativas a:
 - i) Corte litológico dos terrenos atravessados, indicando as profundidades dos mesmos;
 - ii) Perfuração efectuada, referindo diâmetros e profundidades;
 - iii) Profundidades e diâmetros da tubagem de revestimento;
 - iv) Posição dos tubos ralos;
 - v) Preenchimento do espaço anular (maciço filtrante, isolamentos e cimentações);
- q) Outros elementos recolhidos durante os trabalhos;
- r) Constrangimentos ocorridos durante a obra.

5.4. Dimensionamento do equipamento de extracção e tubagem de adução da CAS

Por fim, com base nos resultados obtidos após a realização do ensaio de caudal, Medeiros (2012) define que para a exploração sustentável do recurso é preciso ter em conta os seguintes aspectos:

- i. A escolha do equipamento de bombagem que melhor se adequa às características hidrodinâmicas e regime de exploração da captação;
- ii. Organização do espaço envolvente à captação de forma a permitir com facilidade o seu acesso para operações de vistoria e manutenção;
- iii. Elaboração de plano de exploração adequado às características hidrodinâmicas do binómio captação/aquífero;
- iv. Inspecção e revisão da captação e dos órgãos de extracção segundo uma periodicidade previamente definida;
- v. Realização de ensaios de caudal de aferição segundo uma periodicidade previamente definida/controlo sistemático (conforme a finalidade da água extraída) da qualidade química e bacteriológica do recurso extraído;
- vi. Dimensionamento correcto da tubagem de adução usada para a condução da água desde o ponto de captação até aos pontos de entrega.

6. Caso de estudo - Construção da captação CBR3

O caso de estudo acompanhado corresponde ao da construção da captação CBR3 pela empresa “Carlos Barreira Rodrigues” durante o mês de Novembro de 2015, no recinto do polo de CAS para abastecimento público de Rego de Água, da Câmara Municipal da Moita.

A empreitada para construção e instalação do equipamento de bombagem desta nova captação, resultante de concurso público, foi adjudicada à referida empresa. A construção desta nova captação visa a implementação de uma reserva mecânica à captação PS4 existente no recinto, utilizada para o abastecimento público das localidades de Rego de Água e Cabeço Verde no concelho da Moita. A captação PS4 tem, de acordo com o Decreto-Lei nº 382/1999 de 22 de Setembro, aprovada a delimitação do perímetro de protecção pela Portaria n.º 43/2012, de 1 de Fevereiro. Para além destas captações o recinto conta ainda com um reservatório elevado com 500m³.



Figura 10 - Recinto do polo de CAS de Rego de Água, Moita.

6.1. Enquadramento geográfico

A captação CBR3 foi construída no recinto do polo de CAS da Câmara Municipal da Moita, situado na localidade de Rego de Água, na freguesia de Alhos Vedros, concelho da Moita, próximo do limite administrativo deste último e o do Barreiro, no distrito de Setúbal. O local tem coordenadas geográficas $38^{\circ} 37'51.4''\text{N}$ $9^{\circ}01'17.7''\text{W}$ e está a uma cota aproximada de 30 m.

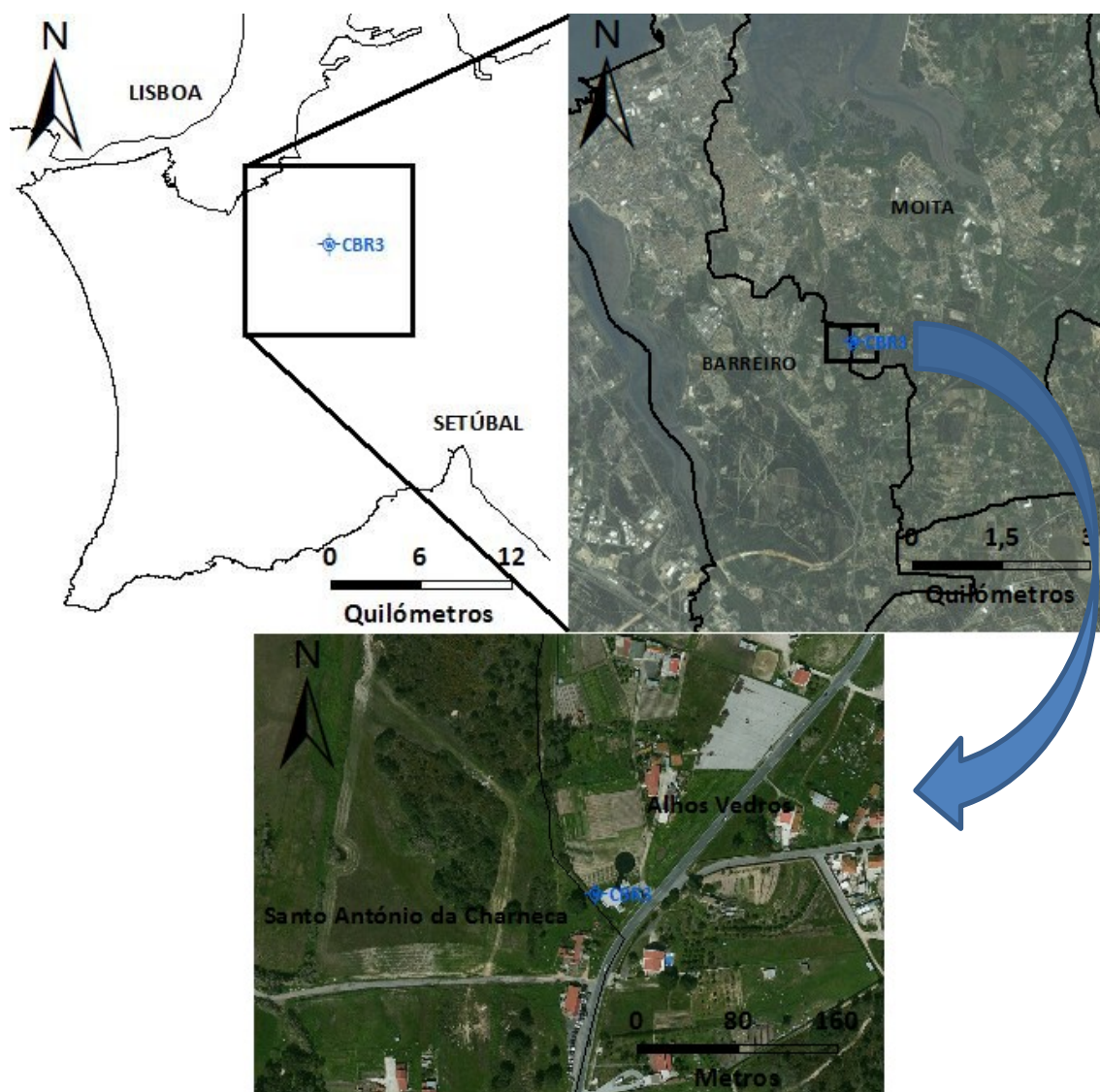


Figura 11 - Enquadramento geográfico e administrativo do local de construção da CAS CBR3.

6.2. Enquadramento geológico e estratigráfico

A nível geológico, o local de implementação da captação, pertence à margem esquerda da Bacia Terciária do Tejo, sendo a região coberta, na Carta Geológica de Portugal, pela folha 34-D (Lisboa), à escala 1/50 000 dos Serviços Geológicos de Portugal (Pais *et al.*, 2006).

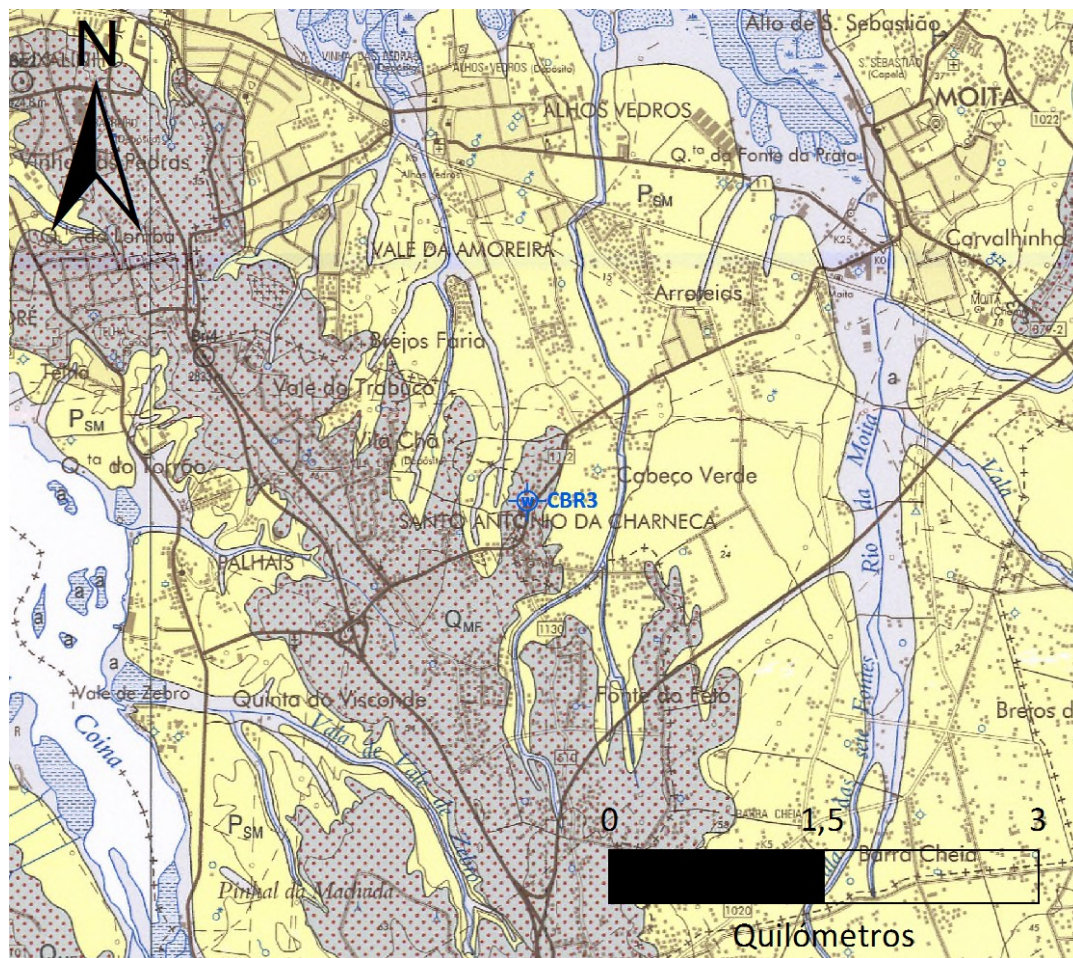
A Bacia Terciária do Tejo consiste numa depressão alongada NW-SW que sofreu subsidência no decurso do Miocénico, tendo como materiais de enchimento depósitos miocénicos recobertos em quase toda a área por depósitos quaternários.

O Miocénico apresenta depósitos continentais alternados com depósitos marinhos, característicos de uma planície fluvial, típica de um estuário e sujeita a transgressões e regressões. Na margem sul do Tejo é apenas aflorante numa faixa, existente na zona norte do concelho de Almada, desde as arribas fósseis da Costa da Caparica até Cacilhas pelo que nem sempre se consegue fazer a separação de algumas unidades como na zona de Lisboa.

O Pliocénico é quase exclusivamente constituído por areias intercaladas por lentículas de argilas. São sedimentos, de origem fluvial, que se encontram à superfície ou a pequena profundidade, constituindo uma espessa camada na zona de Pinhal Novo, ultrapassando os 300 m (Manupella *et al.*, 1999). A oeste da ribeira de Coina, os depósitos pliocénicos são sobrepostos por uma formação conglomerática, os Conglomerados de Belverde, com vários níveis de material grosseiro e separados por níveis arenosos.

Observa-se ainda a Formação de Marco Furado, do Plistocénico, com relativa importância ao longo da Península de Setúbal, de matriz areno-argilosa vermelha, com fracção grosseira abundante e calhaus angulosos a sub-angulosos (Azevêdo, 1982).

Sobre as formações anteriores ocorre o Holocénico sendo representado por areias de duna, areia de praia, depósitos de vertente, aluviões e/ou aterros.



Quaternário	Holocénico	a	Aluviões e/ou aterros
		v	Depósitos de vertente
		ap	Areias de praia
		d	Dunas
	Pleistocénico	Q _{ae}	Dunas antigas e areias eólicas indiferenciadas
		Q _m / Q _f	Q _m - Depósitos de terraços marinhos Q _f - Depósitos de terraços fluviais
		Q _{MF}	Formação de Marco Furado: argilitos e conglomerados
		Q _{PC}	Formação de Porto do Concelho: margas
	Pliocénico	Q _{Be} / P _{SA}	Q _{Be} - Conglomerado de Belverde P _{SA} - Formação da Serra de Almeirim: arenitos e conglomerados
		P _{SM}	Formação de Santa Marta: areias
		1 - M _{CR} - Areolas de Cabo Ruivo (M _{VIIb})	

Figura 12 – Extracto da Carta Geológica 34-D, zona de implementação da CAS e respectiva legenda (adaptado de Pais *et al.*, 2006).

Estratigrafia

De acordo com a notícia explicativa da referida carta da autoria de Pais *et al.* (2006), foram descritas as formações geológicas presentes na margem esquerda do rio Tejo na zona norte da península de Setúbal e que reflectem os materiais de enchimento presentes, desde as formações do topo do Miocénico até às aluviões actuais, sendo as formações presentes na zona de implementação da CAS pertencentes ao Pliocénico (P_{SM}) e Plistocénico (Q_{MF}):

-Neogénico

Miocénico superior (Tortoniano)

M_{CB} - Areolas de Cabo Ruivo e Areolas de Braço de Prata indiferenciadas

Caracterizam-se pela alternância de arenitos, areias e bancadas finas de calcários margosos e gresosos muito fossilíferos, com cerca de 20 metros de espessura.

Como referido anteriormente, afloram apenas no NW da península de Setúbal, numa faixa na zona norte do concelho de Almada, desde as arribas fósseis da Costa da Caparica até Cacilhas. Por não ser possível a individualização das Areolas de Cabo Ruivo e as de Braço de Prata, como na região de Lisboa, na margem sul do Tejo estas formações foram classificadas como indiferenciadas.

Pliocénico

P_{SM} -Formação de Santa Marta (ou Areias de Santa Marta)

Esta formação inclui na base conglomerados pouco espessos, seguindo-se areias finas a grosseiras, quase sempre arcósicas, frequentemente com estratificação entrecruzada e/ou a apresentação de estruturas convolutas, fluviais.

-Quaternário

Plio-Plistocénico

Q_{Be} -Conglomerado de Belverde

Sobrepõe-se às areias de Santa Marta, apresenta clastos sub-rolados esbranquiçados, até 15 cm, em matriz arenosa e tendo cerca de 5 a 10 metros de espessura. Os clastos por vezes apresentam faces polidas pelo vento e são dominados pelos quartzitos, seguindo-se o quartzo e, raramente, o sílex, rochas ígneas alteradas, arenitos e Xistos do Ramalhão, entre outros. O Conglomerado de Belverde corresponde ao último episódio deposicional de um curso de água Pré-Tejo, antes da instalação no canal actual de escoamento (Azevêdo, 1982).

Plistocénico

Q_{PC}-Formação de Porto do Concelho

Na região de Porto do Concelho, estão areias e argilas a aflorar por cima do Conglomerado de Belverde que, segundo Azevêdo (1982), podem corresponder a depósitos lagunares devido ao abandono progressivo do leito antigo do curso Pré-Tejo.

Q_{MF}-Formação de Marco Furado

É uma unidade conglomerática com matriz areno-argilosa, vermelha que atinge 30 a 40 m de espessura. Os clastos são predominantemente de quartzo, angulosos, mas ocorrem também quartzitos, jaspes, sílex e xistos.

São frequentes os encouraçamentos ferruginosos, particularmente para o topo. Às vezes as couraças foram destruídas, restando fragmentos dispersos à superfície do solo.

Apresenta uma fracção argilosa que contém essencialmente ilite e/ou mica e caulinite, normalmente com predomínio de mica (Azevêdo, 1982).

A oeste da Ribeira de Coina, a Formação de Marco Furado assenta sobre os Conglomerados de Belverde enquanto na direcção oposta está encimando a Formação de Santa Marta.

Holocénico

ap-Areias de praia e d-Dunas

Têm grande desenvolvimento na península de Setúbal, especialmente ao longo do arco Caparica-Espichel.

v-Depósitos de vertente

Os depósitos de vertente estão quase sempre presentes no sopé da arriba fóssil da Costa de Caparica, sendo muitas vezes bastante espessos, resultantes da erosão e recuo da arriba.

a-Aluviões e/ou aterros

As aluviões ocorrem ao longo das principais linhas de água da península, ocupam o fundo de vales largos e pouco profundos, com espessuras muito variadas. As sondagens efectuadas no leito do rio Tejo indicam espessuras aluvionares de 58 m. Quanto aos aterros, ocupam algumas das linhas de água na península, depositados com a finalidade de entulhar as mesmas.

6.3. Enquadramento climático

Do ponto de vista climático, a zona de implementação desta captação insere-se numa região de transição, com características variáveis de acordo com o relevo e exposição e que constituem variáveis importantes no balanço hídrico responsável pela manutenção das reservas de água subterrânea. A península de Setúbal constitui, se bem que não directamente, um espaço aberto às massas de ar marítimas. Nesta região incidem assim, em alternância, climas com maior influência atlântica e maior influência continental, coexistindo em espaços fisicamente próximos, estando a zona de estudo sensivelmente na fronteira entre os mesmos. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger (IPMA, 2016) o clima da região na península de Setúbal caracteriza-se como temperado húmido com Verão seco e quente. A região em estudo apresenta uma temperatura do ar média anual de 16 °C (Fig. 14):

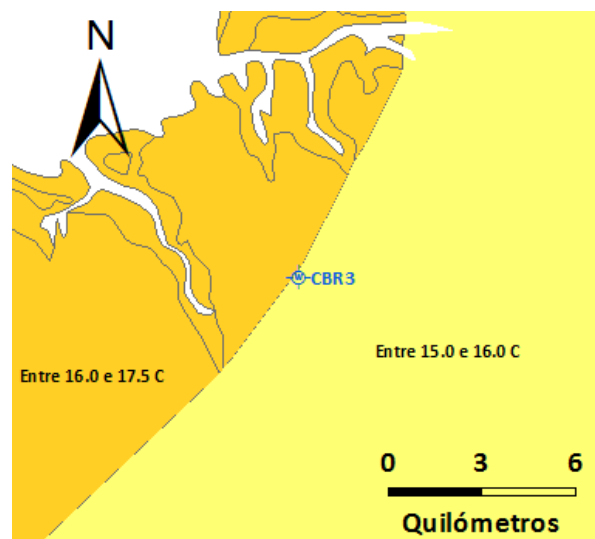


Figura 13 - Temperatura média anual, adaptado de APA (2015).

No que diz respeito à precipitação, a região é caracterizada por valores médios de precipitação anual que rondam os 600 mm (Fig. 15):

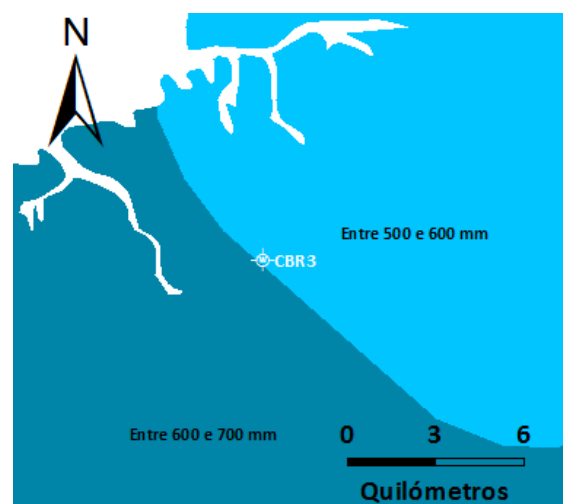


Figura 14 - Precipitação média anual, adaptado de APA (2015).

6.4. Enquadramento hidrogeológico

O local de implementação da captação situa-se na unidade hidrogeológica da Bacia do Tejo-Sado, no sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado – Margem Esquerda.

De acordo com Almeida *et al.* (2000), a divisão hidrogeológica de Portugal Continental é feita em quatro grandes unidades que correspondem aos limites da divisão morfo-estrutural do país: o Maciço Antigo, a Orla Ocidental, a Bacia Tejo-Sado e a Orla-Meridional.

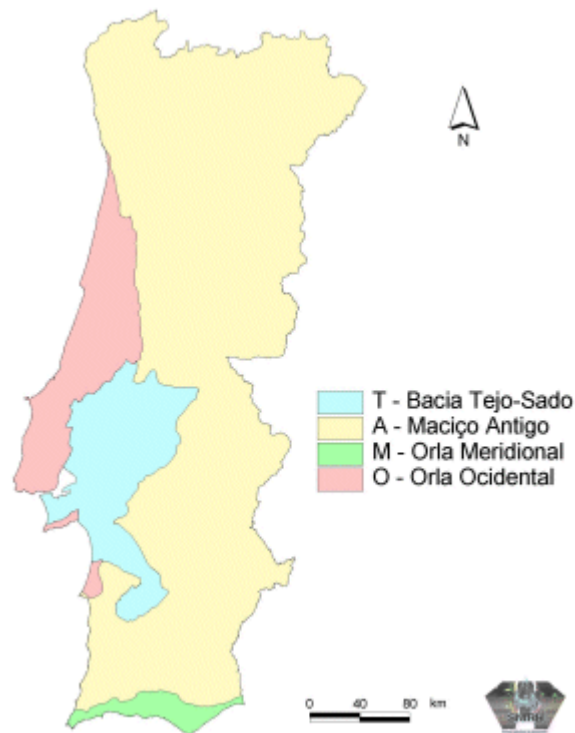


Figura 15 - Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental, retirado de SNIRH (2015).

Cada unidade hidrogeológica engloba diversos sistemas aquíferos, sendo que as diferenças em termos de transmissão e armazenamento de água subterrânea são devidas, como expectável, às diferentes formações geológicas que servem de suporte para cada sistema aquífero presente.

De modo geral, por serem constituídas essencialmente por rochas detríticas e carbonatadas pouco afectadas pelo metamorfismo, é nas Orlas Meso-Cenozóicas que se encontram os sistemas mais produtivos. Em oposição, é no Maciço Antigo, constituído maioritariamente por rochas vulcânicas e metassedimentares, que se encontram os sistemas menos produtivos, sendo as excepções a assinalar os sistemas associados a maciços carbonatados.

Unidade Hidrogeológica da Bacia do Tejo-Sado

A Bacia do Tejo-Sado constitui uma depressão alongada segundo NE-SW, ladeada a W e N pelas formações mesozóicas da Orla Ocidental, a NE, E e SE pelo maciço hercínico e comunica a Sul com o Oceano Atlântico, na Península de Setúbal.

É composta por formações detríticas pertencentes ao Terciário (formações fundamentalmente pliocénicas e miocénicas) e Quaternário (aluviões e terraços) tendo 6875 km² e abrangendo 26 concelhos, constitui o maior sistema aquífero de Portugal (Almeida *et al.*, 2000).

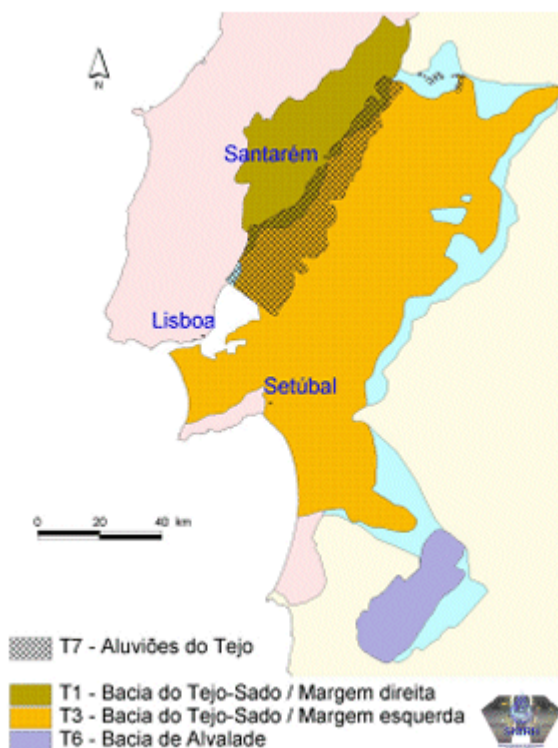


Figura 16 - Sistemas aquíferos da Bacia do Tejo-Sado, retirado de SNIRH (2015).

Os mesmos autores consideraram para esta unidade quatro sistemas aquíferos: as Aluviões do Tejo (T7), a Margem Direita (T1), a Margem Esquerda (T3) e a Bacia de Alvalade (T6). Ainda assim os mesmos autores ressaltam que a divisão entre estes três primeiros é algo artificial, já que é bastante provável, embora não muito evidente, visto não existirem fronteiras bem definidas entre eles. No entanto, a presença da Falha do Tejo, a ocorrência de diferenças nos ambientes de sedimentação e o facto do rio Tejo ser o eixo drenante principal da bacia, são factores que validam a referida divisão. Quanto ao tipo, os sistemas são classificados como porosos, sendo a excepção o sistema da Margem Direita, que devido à natureza litológica da região, é considerado do tipo poroso-cársico.

Sistema aquífero da Margem Esquerda da Bacia do Tejo-Sado

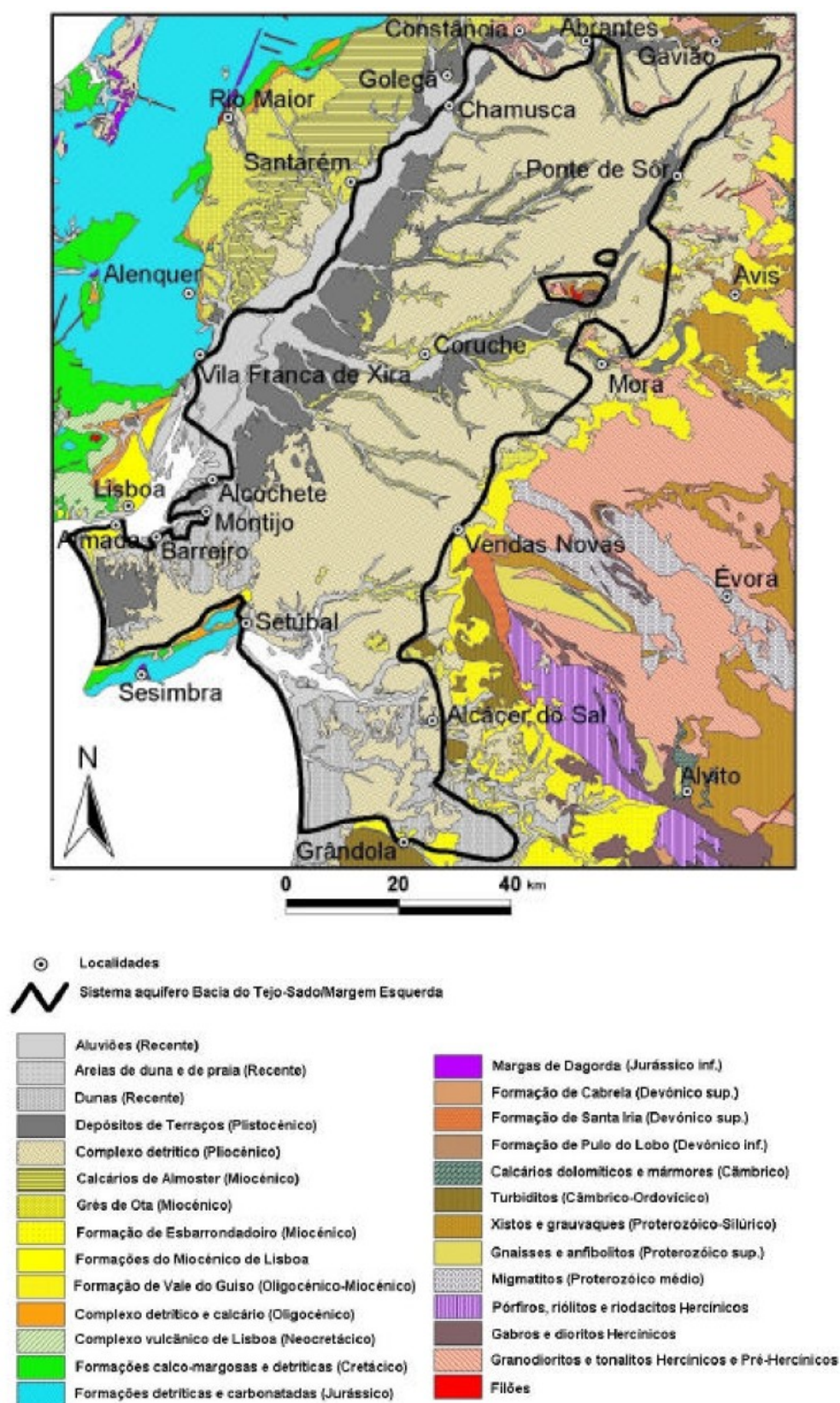


Figura 17 - Litostratigrafia do sistema aquífero da Margem Esquerda da Bacia do Tejo-Sado, retirado de Almeida *et al.* (2000).

De acordo com Almeida *et al.* (2000) o sistema aquífero Margem Esquerda da Bacia do Tejo-Sado é formado por várias formações porosas, que variam o seu comportamento hidrogeológico de aquífero confinado a semiconfinado, devido às frequentes variações laterais e verticais nas fácies litológicas. Estas variações devem-se às diferentes condições de deposição no Miocénico, que variaram entre deposição marinha e continental, sendo estas passagens graduais. Os mesmos autores referem que a complexidade litológica e estrutural, resulta num conjunto alternante de camadas aquíferas separadas por outras de permeabilidade baixa ou muito baixas (aquitardos e aquicludos) em alguns locais com predomínio de uma ou outra classe de formações hidrogeológicas.

Assim, de acordo com Almeida *et al.* (2000) e Pais *et al.* (2006), na Península de Setúbal o sistema aquífero da Margem Esquerda é constituído por um aquífero superior livre, instalado nas camadas do topo do Pliocénico e depósitos detríticos recentes, que se sobrepõe a um aquífero confinado, multicamada, suportado pelas camadas inferiores do Pliocénico e as camadas areníticas, calco-areníticas e margosas do Miocénico médio e superior. A maior profundidade, separado por camadas espessas de sequências essencialmente margosas, existe ainda outro aquífero confinado, também multicamada, sendo constituído por camadas gresocalcárias da base do Miocénico. Este aquífero tem, geralmente, valores de permeabilidade e qualidade das águas inferiores e apresenta-se a grandes profundidades. Assim, devido a essas condições que o aquífero apresenta, torna-se num alvo pouco atractivo para a pesquisa e exploração, sendo pouco conhecido.

A recarga é feita por infiltração directa nos depósitos detríticos pliocénicos e/ou quaternários que cedem parte dessa infiltração para formações mais profundas do Pliocénico e Miocénico. O Miocénico faz a recarga por drenância (pelas camadas supradjacentes do Pliocénico) e infiltração directa da precipitação atmosférica na área onde aflora.

Para a zona de estudo, Simões (1998) caracteriza a espessura das camadas pliocénicas e miocénicas na região segundo o perfil geológico entre Xabregas e Palmela (passando pela zona de implementação da CAS em Alhos Vedros, Moita):

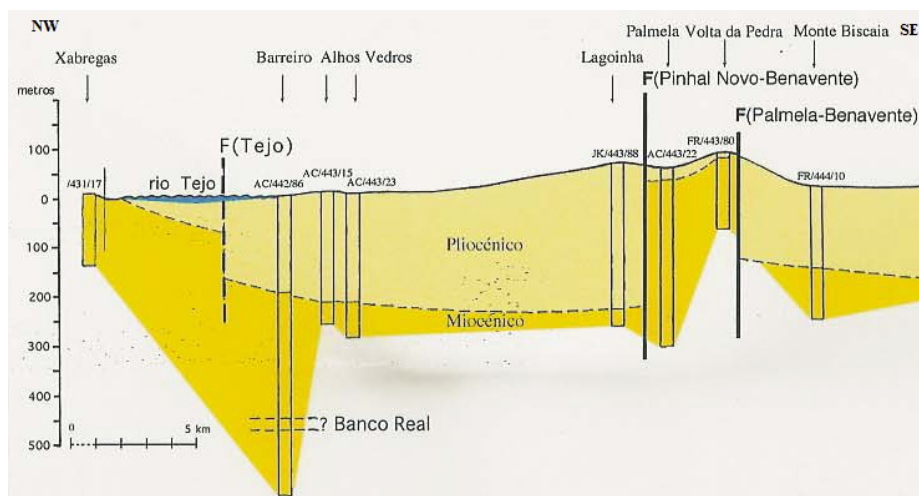


Figura 18 - Corte geológico Xabregas-Palmela, adaptado de Simões (1998).

Relativamente às direcções de fluxo subterrâneo, Simões (1998) traçou uma carta de isopiezas a partir dos níveis hidrostáticos medidos nos furos com profundidades inferiores ou iguais a 50 metros (Fig. 19). Sendo que a opção deste método pela autora deve-se à consideração pela mesma que o aquífero apresenta: “comportamento livre à escala regional, de grande potência, heterogéneo, anisótropo”. Na área de implementação da captação, como se pode constatar, a superfície piezométrica traçada mostra a tendência global do fluxo subterrâneo para o leito do rio Tejo.

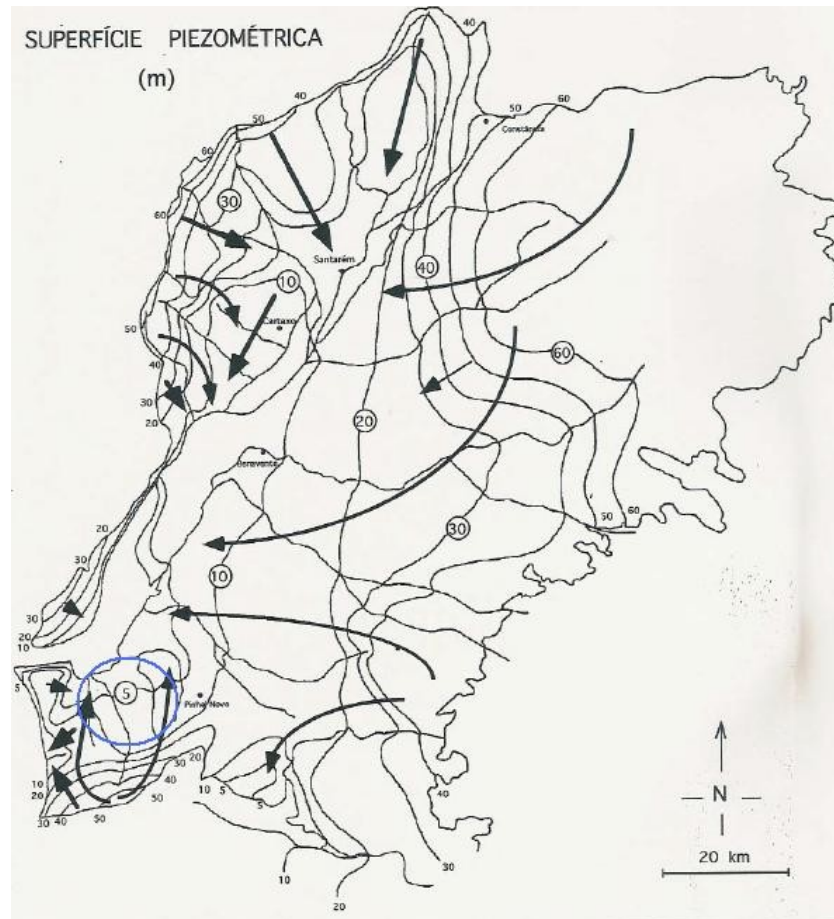


Figura 19 - Mapa de Isopiezas para o sistema aquífero da Bacia do Tejo-Sado, com a zona de estudo (assinalada a azul), adaptado de Simões (1998).

Para a caracterização dos principais aspectos da produtividade e qualidade das águas do sistema aquífero da Margem Esquerda da Bacia do Tejo-Sado, Almeida *et al.* (2000), consideraram separadamente, os aquíferos que têm como suportes principais: o Pliocénico, o Miocénico com características marcadamente continentais (Arenitos de Ota) e o Miocénico francamente marinho (Série greso-calcária marinha).

De um modo geral, estas formações aquíferas são constituídas por: areias, com intercalações lenticulares de argilas, no caso do Pliocénico; arenitos com algumas intercalações de argilas, no Miocénico com características marcadamente continentais; e arenitos calcários e margas, com espessuras superiores a 450 m, no Miocénico francamente marinho (Almeida *et al.*, 2000).

Produtividade

De acordo com Almeida *et al.* (2000), os caudais das captações implantadas no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, em l/s, que resultam de 124 dados para o Pliocénico, 134 para o Miocénico marcadamente continental e 67 para o Miocénico francamente marinho, são caracterizados pelas seguintes estatísticas:

Tabela 1 - Estatísticas dos caudais das captações implantadas no Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida *et al.* (2000).

	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
Pliocénico	18,6	14	0,08	8,1	15,5	24	66,6
Miocénico marcadamente continental	14,7	15,6	0,5	5,6	9,7	16,8	90
Miocénico francamente marinho	39,1	25,5	4,1	19,6	35	54,4	110

Dos quais foram calculados os valores de transmissividade e o coeficiente de armazenamento (apenas para o Miocénico marinho), por ensaios de bombagem:

Tabela 2 - Valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento calculados para o Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida *et al.* (2000).

	n (ensaios de bombagem)	Transmissividade, T (m ² /d)	Coeficiente de armazenamento, S
Pliocénico	15	100 a 3000	-
Miocénico marcadamente continental	2	12 a 500	-
Miocénico francamente marinho	2	1728 a 3456	0,001

E as transmissividades estimadas por caudais específicos (obtidos através da realização de ensaios de caudal):

Tabela 3 - Valores de transmissividades estimadas por caudais específicos para o Pliocénico e Miocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado, adaptado de Almeida *et al.* (2000).

	n (caudais específicos)	Transmissividade, T (m ² /d)	Valores mais freq. de T (m ² /d)
Pliocénico	135	19 a 2029	97 a 307
Miocénico marcadamente continental	176	3 a 1500	45 a 179
Miocénico francamente marinho	101	29 a 4100	127 a 693

Hidrogeoquímica

Quanto à fácies das águas, esta é estimada a partir de análises químicas da década de 90 (Almeida *et al.*, 2000).

Para as captações instaladas no Pliocénico, as fácies das águas são predominantemente cloretadas sódicas e cálcicas, com algumas fácies bicarbonatadas calco-magnesianas.

As águas captadas do Miocénico, devido às complexas e frequentes variações laterais e verticais de fácies, levam ao surgimento de grande diversidade físico-química das suas águas subterrâneas, predominando a fácies bicarbonatada calco-magnésiana.

No entanto, na Península de Setúbal, grande parte das captações exploram em conjunto as águas do Pliocénico e do Miocénico francamente marinho a maiores profundidades. As fácies destas águas de mistura são as fácies bicarbonatadas cálcicas, cloretadas sódicas e ainda cloretadas cálcicas, ou seja, as fácies típicas para cada uma das formações (fig. 20):

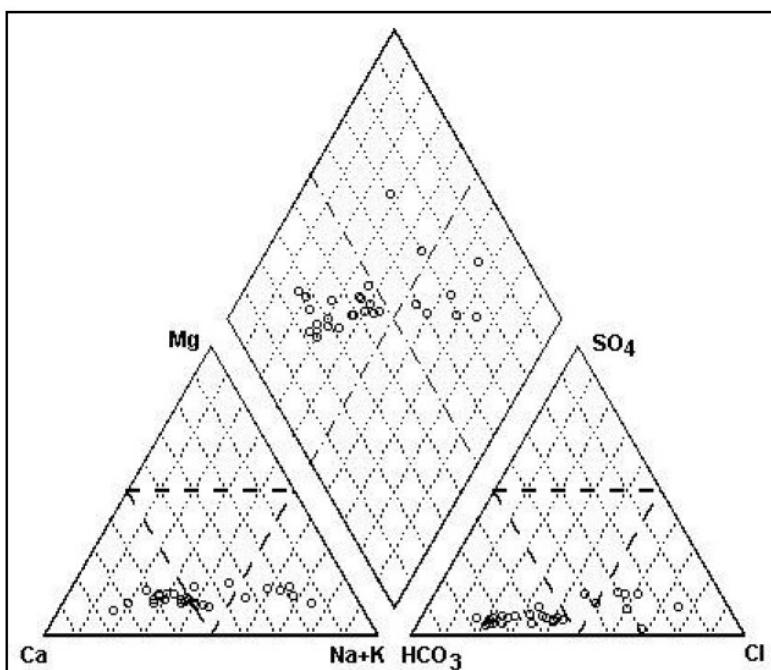


Figura 20 - Diagrama de Piper, águas captadas do Pliocénico e Miocénico franc. marinho, adaptado de Almeida *et al.*(2000).

Qualidade das águas captadas para consumo humano

Relativamente às águas captadas no conjunto Pliocénico e Miocénico francamente marinho, verifica-se que o ferro é o ião que ultrapassa os VMA definidos tanto no Anexo I como no Anexo VI do Decreto-Lei nº 236/1998 de 1 de Agosto. Quanto aos VMR só três parâmetros não ultrapassam: o pH, o magnésio e o potássio.

7. Caracterização da construção da captação CBR3

7.1. Método de furação

O método de furação utilizado nesta obra foi a rotação pelo sistema de circulação inversa. A escolha deste método por parte da empresa deveu-se ao conhecimento prévio das condições geológicas regionais, nomeadamente a alternância de formações geológicas compostas por níveis arenosos e argilosos lenticulares, bem como a necessidade de construção de um furo de elevado diâmetro e profundidade.

A preparação dos trabalhos teve lugar na semana de 9 a 14 de Novembro de 2015, com a deslocação da sonda de furação, retroescavadora, abertura do tanque de lamas e a montagem do estaleiro de obra no recinto.

Os trabalhos de furação iniciaram-se a 16 de Novembro, tendo a sondagem atingido um total de 251 metros. A furação foi realizada com um diâmetro de 550mm até aos 142m de profundidade prosseguindo-se com um diâmetro de 430mm até à profundidade final.

A técnica de furação como referido no capítulo da caracterização dos métodos de furação de CAS, baseia-se na conjugação da rotação de uma peça de corte (trialeta) e peso proporcionado pela constituição da coluna de furação e a contínua injeção de lamas de estabilização no furo, sendo estas “aspiradas” em conjunto com os detritos de furação pelo interior da trialeta, retornando ao tanque de decantação. A caracterização pormenorizada dos constituintes deste método de furação é a seguinte:

Sonda – consiste no atrelado que suporta a torre, e todos os outros componentes da sonda;

Torre - torre da sonda que tem como função criar uma sustentação para as roldanas de elevação de cargas;

Roldanas de elevação de cargas - sistema de roldanas que realiza a elevação da haste “kelly”, bem como de todas as cargas necessárias durante o processo;

Mesa de rotação – Mesa de rotação responsável por transmitir o movimento de rotação à coluna de perfuração. Tem igualmente a função de criar o suporte da coluna de furação entre cada manobra de inserção de novas varas de sondagem durante a perfuração ou o suporte da coluna de revestimento durante a fase de instalação de entubamento e construção do maciço filtrante;

Haste “kelly” – Vara de secção quadrada, à qual é transmitido o movimento de rotação por parte da mesa de rotação e por conseguinte a toda a coluna de furação, composta pelas varas de sondagem e trialeta no fundo do furo;

Varas de sondagem – Varas adicionadas a cada manobra, entre a trialeta na base e à haste “kelly” no topo por meio de parafusos e porcas, apresentam canais laterais para a condução do ar comprimido que permite a formação da emulsão lamas+detritos das formações atravessadas, que por sua vez é aspirada desde o fundo do furo até ao tanque de decantação à superfície. Para esta obra foram utilizadas varas de sondagem com 3 metros;

Trialeta – peça de corte, responsável pela desagregação do terreno no fundo do furo e pelo interior da qual ocorre a ascensão da emulsão lamas+detritos das formações atravessadas;

Painel de comandos da sonda – zona de controlo dos sistemas da sonda, sejam as roldanas de elevação, a mesa de rotação;

Compressor – utilizado para gerar o ar comprimido que permite a circulação das lamas de estabilização no sistema e, por conseguinte a subida dos detritos desde o fundo do furo até à superfície;

Tanque de lamas – tanque de preparação das lamas de estabilização a partir do qual são injectadas as mesmas à boca do furo;

Tanque de decantação – zona criada para a recepção das lamas e detritos das formações atravessadas. Local de filtragem das lamas para a realização da amostragem dos terrenos atravessados.

7.2. Amostragem

Durante a furação foram recolhidas amostras no retorno das lamas ao tanque de decantação, pela filtragem das mesmas a intervalos regulares de aproximadamente 1 metro, sendo posteriormente depositadas, na respectiva calha, as amostras de acordo com a profundidade de proveniência (fig. 21). De seguida foi realizada a descrição litológica das amostras recolhidas (em termos de litologia/granulometria e cor) e, por conseguinte, a elaboração da coluna estratigráfica dos terrenos atravessados pelo furo (anexo nº1), tendo sido atravessados essencialmente níveis arenosos e argilosos de formações pliocénicas e plistocénicas.



Figura 21 - Amostras recolhidas a cada metro de furação.

A amostragem assim obtida apesar de recolhida após a aplicação de um método de furação destrutivo pode-se considerar representativa dos terrenos atravessados. No entanto, a necessidade da utilização de lamas de estabilização (mistura de água e bentonite) durante a furação leva a que seja bastante difícil realizar a distinção correcta entre as fracções mais finas das formações atravessadas e a bentonite utilizada no método. Este pormenor leva invariavelmente a que quem procede à classificação das amostras e não tem experiência na realização desta tarefa, construa uma coluna litostratigráfica que pode não representar fielmente o ambiente geológico presente, marcado essencialmente pela alternância de níveis arenosos e argilosos por vezes lenticulares, que podem ser facilmente confundidos com as argilas das lamas de estabilização utilizadas.

Tendo por base a amostragem recolhida, foram definidos os níveis alvo/horizontes mais produtivos, representados na amostragem por níveis compostos essencialmente por areias médias a grosseiras, provenientes dos seguintes intervalos de profundidade:

Tabela 4 - Intervalos de profundidade dos níveis alvo definidos com base na amostragem realizada.

Topo (m)	Base (m)
135	144
152	157
162	164
167	173
189	196
198	204
213	219
225	233

Com base nos intervalos de profundidade dos níveis alvo, foram definidas as profundidades preferenciais de posicionamento dos tubos-ralo a instalar na colocação da coluna de revestimento do furo.

7.3. Coluna de revestimento

A coluna de revestimento deste furo caracteriza-se por ser em tubos de PVC da marca TuboFuro[®], modelo Georoscado Reforçado². Tal como o nome do produto sugere, apresenta uniões roscadas, tendo 5 metros de comprimento cada tubo e sendo a coluna telescópica, com um cone de redução de diâmetro instalado aos 125m de profundidade. A configuração da instalação dos diferentes segmentos foi a seguinte:

-Da superfície até aos 125m de profundidade, tubagem lisa com diâmetro nominal de 330mm e 20mm de espessura, zona da câmara de bombagem;

-Dos 125m aos 126,5m de profundidade, cone de redução de diâmetro (330mm para 225mm);

-Dos 126,5m aos 241,5m de profundidade, tubagem com diâmetro nominal de 225mm e 13mm de espessura, fechada na base, zona captante composta pela alternância de tubos lisos e tubos ranhurados totalmente ou parcialmente de fenda horizontal (os intervalos de extensão das zonas ranhuradas posicionadas tendo em conta os níveis alvo definidos com base na amostragem realizada encontra-se representada na Fig. 23). Para manter a tubagem vertical e centrada no interior do furo, nesta zona foi instalado um centralizador a cada 5 metros (Fig. 22).



Figura 22 - Tubagem de revestimento para a zona captante.

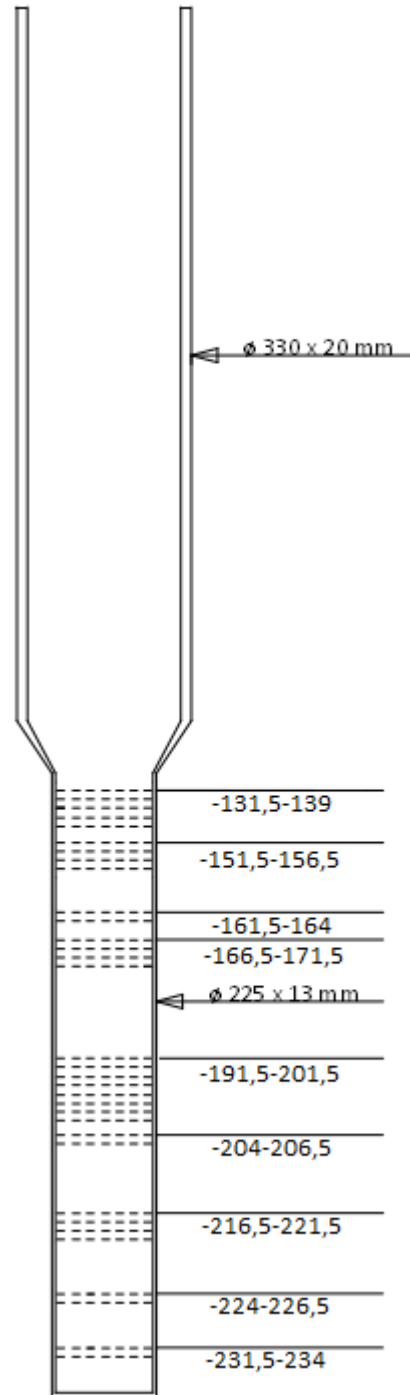


Figura 23 – Esquema da configuração da coluna de revestimento.

²o produto apresenta uma homologação com certificação do LNEC(DH 929) para a utilização em revestimento de furos de captação de água subterrânea.

7.4. Maciço filtrante e isolamentos intercalares

Construiu-se um maciço artificial desde a profundidade final de furação (251 metros) até cerca dos 33 metros de profundidade, composto por seixo calibrado, de natureza siliciosa, esfericidade elevada e granulometria entre 4 a 8 mm. Na construção do maciço filtrante, colocação do seixo no espaço anular foi realizada de forma lenta e gradual para não afectar a sua continuidade.



Figura 24 - Seixo para a construção do maciço filtrante.

Alternando com a construção do maciço filtrante foram aplicados dois isolamentos intercalares compostos por *pellets* de compactonite, o primeiro dos 110m aos 115m de profundidade e o segundo dos 30m aos 33m, com o objectivo de isolar e salvaguardar a qualidade dos níveis captados. Dos 30m até à superfície, o espaço anular foi preenchido com argilas constituindo assim a primeira barreira abaixo da lage de cimento à superfície para as águas com potenciais contaminantes que eventualmente possam infiltrar-se a partir da superfície.

7.5. Limpeza e desenvolvimento

A operação de limpeza e desenvolvimento da captação foi realizada pelo método hidromecânico de injeção de ar-comprimido no furo ("ar-lift") a intervalos de 20 minutos por hora, durante um período total de 3 dias. Nos primeiros intervalos de realização desta operação, a água extraída apresentava-se turva (devido às lamas em suspensão utilizadas no método de furação), constantando-se uma diminuição gradual da turvação essencialmente ao longo do primeiro dia de realização desta tarefa. No início do último dia de execução desta tarefa, a água extraída apresentava-se à boca do furo limpa e sem finos.



Figura 25 - Aplicação do método de limpeza e desenvolvimento "air-lift".

7.6. Ensaio de caudal escalonado

No sentido de se determinar os parâmetros hidráulicos da captação CBR3, foi programado um ensaio de caudal escalonado na captação com início às 10h45 do dia 30 de Novembro de 2015 e com a duração de bombagem, sem recuperação dos níveis piezométricos e de acordo com 4 escalões de bombeamento num intervalo temporal de 36 horas.



Figura 26 – Equipamento para a realização do ensaio de caudal escalonado.

Lamentavelmente, por imposição do dono de obra, o ensaio foi interrompido ao fim de 18 horas após ter sido iniciado. O resumo dos rebaixamentos medidos para cada escalão de extracção ensaiado foi o seguinte:

Início do ensaio - NHE = 39,25m

Escalão 1 - $Q_1=30\text{l/s}$ (duração 375 min); NHD = 52,15m; $s = 12,9\text{m}$

Escalão 2 – $Q_2=40\text{l/s}$ (duração 1010 min); NHD = 56,93m; $s = 17,68\text{m}$

Apesar de os resultados serem de qualidade inferior ao desejável, com os dados disponíveis procedeu-se ao cálculo do valor da eficiência da captação para diversos caudais teóricos bem como a estimação do valor da transmissividade do aquífero. O registo dos rebaixamentos medidos durante o ensaio está em anexo (anexo nº2), tendo sido projectados os valores dos rebaixamentos medidos ao longo do tempo de realização, no gráfico correspondente (Fig. 27):

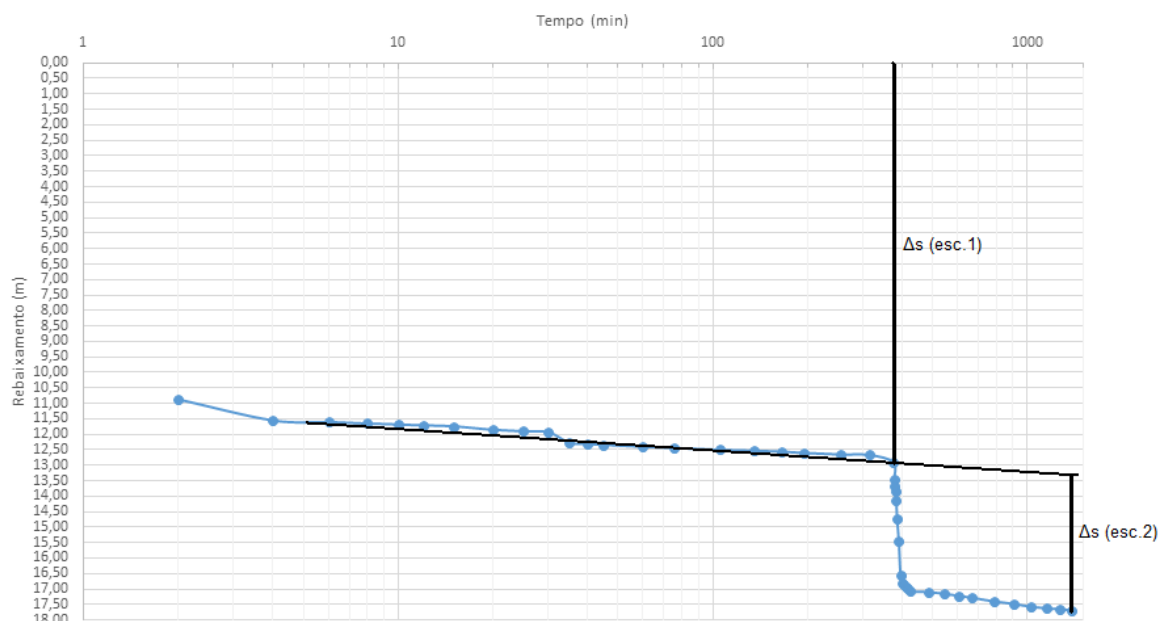


Figura 27 – Rebaixamentos medidos no furo em relação à duração do ensaio.

Os dados do ensaio para cada escalão considerado, em termo de valores da duração, caudais extraídos, variação de caudal de extracção, variação de rebaixamentos, rebaixamentos acumulados, caudais acumulados e rebaixamentos específicos encontram-se na tabela 5:

Tabela 5 - Resumo da variação de caudal, rebaixamento e rebaixamento específico para os dois escalões testados.

Escalão	t (min)	Q (l/s)	Q (m³/d)	ΔQ (m³/d)	Δs (m)	s _{ac} (m)	Q _{ac} (m³/d)	s _{ac} /Q _{ac} (d/m²)
1	375	30	2592	2592	12,91	12,91	2592	4,98E-03
2	1010	40	3456	864	4,75	17,66	3456	5,11E-03

Seguidamente projectaram-se os valores de rebaixamento específico (s_{ac}/Q_{ac}) em relação aos valores de caudal acumulado (Q_{ac}) (Fig. 28):

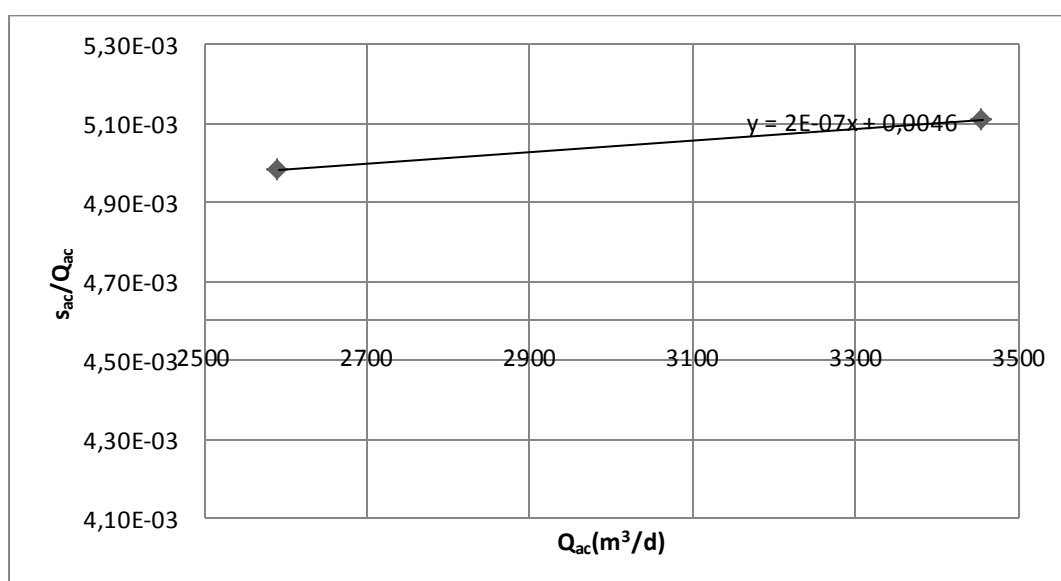


Figura 28 - Rebaixamento específico vs caudais acumulados.

Os valores para o cálculo das perdas de carga, lineares (B) e quadráticas (C), a utilizar na equação dos rebaixamentos: $s_w=BQ+CQ^2$, foram obtidos, respectivamente pela correspondência entre os valores da ordenada na origem e declive da equação da recta mais provável relativamente aos pontos representados no gráfico anterior ($y=4,6*10^{-3}+2*10^{-7}x$):

$$(B) = 4,6*10^{-3}$$

$$(C) = 2*10^{-7}$$

Assim, para esta CAS, a fórmula dos rebaixamentos (s_w) em função do caudal extraído é a seguinte:

$$s_w=4,6*10^{-3}Q+2*10^{-7}Q^2$$

Para o cálculo da eficiência da captação (EFC), foi considerada uma gama de caudais teóricos de exploração (desde 250 a 3000 m³/d):

Tabela 6 - Cálculo da eficiência da CAS para diferentes caudais teóricos de exploração.

Q (m ³ /d)	BQ	CQ ²	BQ+CQ ²	[BQ/(BQ+CQ ²)]	EFC (%)
250	1,15	0,013	1,163	0,989	98,92
500	2,3	0,050	2,350	0,979	97,87
750	3,45	0,113	3,563	0,968	96,84
1000	4,6	0,200	4,800	0,958	95,83
1250	5,75	0,313	6,063	0,948	94,85
1500	6,9	0,450	7,350	0,939	93,88
1750	8,05	0,613	8,663	0,929	92,93
2000	9,2	0,800	10,000	0,920	92,00
2250	10,35	1,013	11,363	0,911	91,09
2500	11,5	1,250	12,750	0,902	90,20
2750	12,65	1,513	14,163	0,893	89,32
3000	13,8	1,800	15,600	0,885	88,46

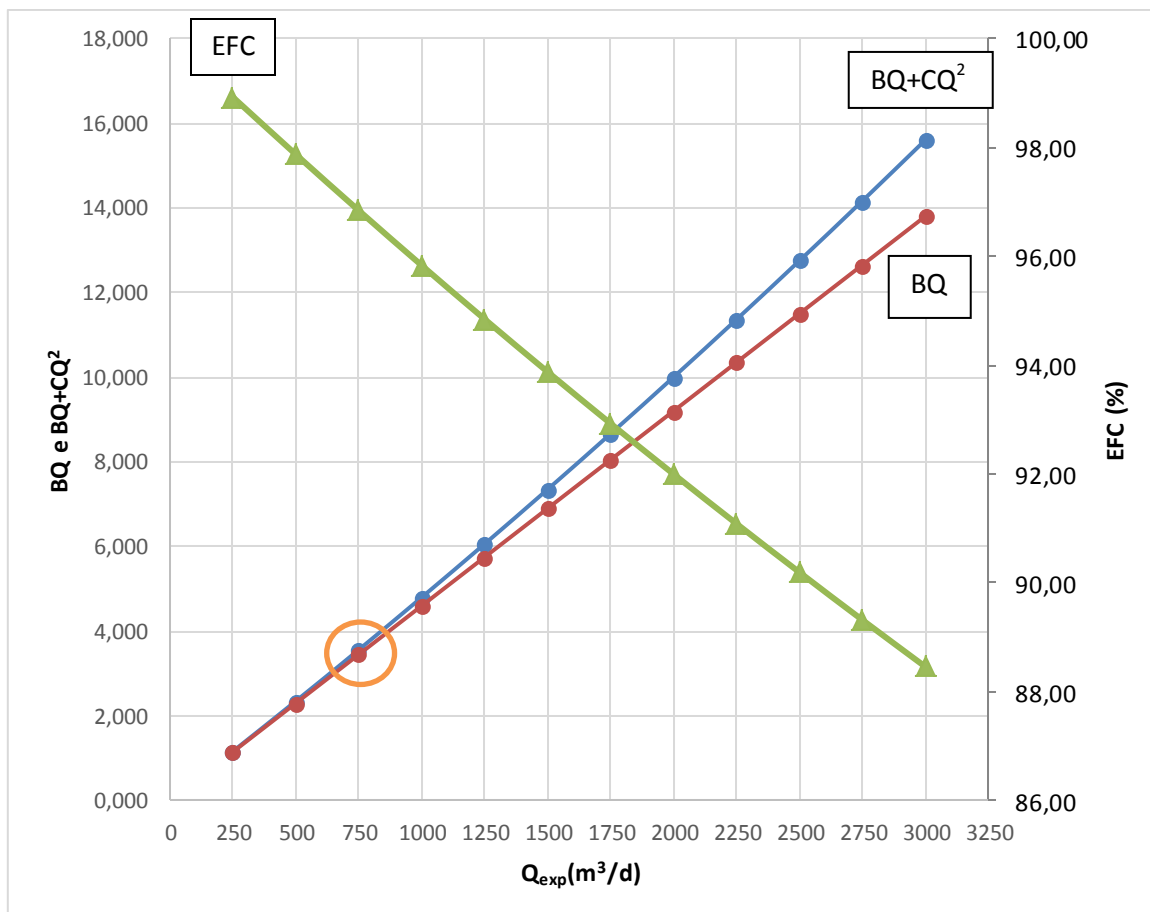


Figura 29 – Representação gráfica das curvas características da captação: perdas de carga lineares (BQ, a vermelho), rebaixamento ($BQ+CQ^2$, a azul) em função de diversos caudais teóricos de exploração e a respectiva eficiência da captação (EFC, a verde) para a CAS CBR3.

Analisando o gráfico de curvas características apresentado na figura 29, foi considerado um caudal ideal de exploração (Q_e) que deverá corresponder a aproximadamente de $750 \text{ m}^3/\text{d}$ (assinalado a laranja no gráfico), tendo a captação uma eficiência de 96,84% para esse valor de caudal. No entanto há que salvaguardar que estes valores podem não ser considerados válidos, tendo em conta que o ensaio foi interrompido ao fim de dois escalões de extracção, não podendo assim ser considerado um ensaio completo.

A estimativa para o valor de transmissividade do aquífero de acordo com a fórmula de Logan (1964), para o caudal de exploração anteriormente considerado, tendo em conta o caudal específico é igual a:

$$q = \frac{Q_e}{S_p} = \frac{750}{3,563} = 210,5 \text{ m}^2/\text{d}$$

$$T = 1,22 * q = 1,22 * 210,5 = 256,8 \text{ m}^2/\text{d}$$

Apesar de todas as condicionantes, o valor de transmissividade obtido encontra-se dentro do intervalo de valores de transmissividade mais frequentes estimadas por Almeida *et al.* (2000) para as CAS implantadas no Pliocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado (entre 97 a $307 \text{ m}^2/\text{d}$).

7.7. Desmontagem do estaleiro de construção

Após a construção da captação e execução do ensaio de caudal, houve a necessidade de proceder à minimização de impactes e a reabilitação do local de construção. Como abordado no início do capítulo 7, o método de furação para além de ser constituído por uma sonda de grandes dimensões, durante as manobras de sondagem requiere a construção de um tanque de grandes dimensões para o retorno das lamas e detritos de furação durante a sondagem. Na fase de remobilização da sonda/desmontagem do estaleiro de obra, e com o objectivo de reabilitar o local de construção, foi necessário proceder à drenagem deste tanque, o que levou por sua vez à construção de valas e diques que deram origem a canais de drenagem incipiente, mas que invariavelmente transportaram um elevado volume de água com lamas em suspensão para os terrenos próximos. Após a drenagem do tanque de lamas procedeu-se à colmatação do mesmo pela construção de um aterro com os materiais utilizados na altura da sua escavação.



Figura 30 – Vala para a drenagem do tanque de decantação de lamas.



Figura 31 – Ribeiro resultante da drenagem do tanque de lamas.

7.8. Isolamento sanitário e instalação do equipamento de bombagem

Estas etapas consistiram em:

- cimentações à superfície e construção de uma caixa de betão de secção quadrada, instalação da tampa estanque em alumínio de protecção da boca da CAS e suporte ao equipamento de bombagem;
- instalação da bomba submersível de 10'', modelo Z10275, da marca Lowara (e dos mecanismos de funcionamento e protecção da mesma), bem como da tubagem de adução da captação.



Figura 32 - Caixa da CAS CBR3.



Figura 33 - Tubagem de adução.

8. Considerações finais e conclusões

De acordo com o que foi referido nos capítulos iniciais relativamente à construção e implementação de captações de água subterrânea estes podem ser processos longo cuja maior ou menor complexidade e morosidade resultam do destino da água a captar. Em todos os casos devem ser obras bem planeadas tanto por parte do dono de obra como da empresa que irá proceder à construção da captação. A fase de projecto é essencial para o dimensionamento correcto da captação a executar face aos caudais de extracção necessários.

Apesar da crescente consciencialização das empresas que realizam a prospecção e pesquisa de águas subterrâneas, é preciso ter em conta que nem todas elas apresentam a aptidão, em termos de meios materiais, humanos e de conhecimentos, para a execução de furos de CAS que preencham os requisitos que permitam a captação de águas para todos os fins a que se destinam.

Deve ter-se em consideração que, quando a obra de execução de um furo, com o objectivo de ser transformado em CAS, é realizada com deficiente qualidade, sem hipótese do seu aproveitamento posterior, ou mesmo que seja abandonado antes de finalizar a obra, por incapacidade de resolução dos problemas originados quer por falta de equipamentos adequados, quer por falta de meios, ou mesmo ausência dos conhecimentos técnicos necessários, pode conduzir a atrasos na execução das obras e mesmo a desastres financeiros e/ou ambientais.

Relativamente à técnica de furação, o facto de ser necessário o abastecimento de água durante a sondagem é uma das grandes limitações do método, pois sendo uma técnica direccionada para a construção de furos de captação de água, acaba por ser, de certa forma um constringimento este facto, pois a aplicação da técnica pode estar condicionada em locais em que o abastecimento seja um problema ainda que ultrapassável. A sonda para a aplicação desta técnica tem um impacte ambiental que não pode ser negligenciado, quer os impactes de pequena dimensão como a perda de óleos por parte dos sistemas mecânicos ou o ruído provocado pelo funcionamento da mesma, quer os de maior envergadura, como a necessidade da abertura de um tanque de lamas de grandes dimensões. Deve ter-se em conta que o método utilizado tem elevados consumos de combustível.

Durante o acompanhamento desta obra deparamo-nos com alguns constrangimentos, dos quais se destacam:

i. No recinto onde se construiu a captação CBR3, a uma distância de cerca de 20 m, existe uma captação (PS4) construída em 2004 (referido no capítulo 7). Apesar da proximidade entre as duas sondagens, as respectivas colunas litostratigráficas são significativamente diferentes. Acrescendo que a terminologia utilizada na classificação das amostras é distinta, o que conduz a que os contactos geológicos e espessuras das formações não coincidam, pelo que não foi possível realizar a desejável correlação litostratigráfica entre os dois furos. Estas discrepâncias resultam não só dos critérios de classificação macroscópica dos técnicos envolvidos como poderão estar associadas a diferenças qualitativas das amostragens.

ii. Na definição da configuração final da coluna de revestimento, em termos do posicionamento dos tubos-ralo, nem sempre foi possível posicionar os ralos centrados com os níveis alvo, o que levou a que parte de tubos-ralo tenha parte da área aberta em zonas não produtivas (níveis argilosos). Este facto advém de que os tubos utilizados na construção da coluna de revestimento têm 5 m de comprimento e puderem apresentar ranhuras a toda a sua extensão ou em metade desse comprimento, nem sempre se tornando possível conjugar de forma ideal a posição dos ralos em relação às formações produtivas, devido à ocorrência de níveis argilosos lenticulares presentes ao longo do furo. De qualquer modo os horizontes potencialmente produtivos terão sido aproveitados na sua plenitude como de resto se pode concluir, ainda com reservas, da produtividade final da captação.

iii. No ensaio de caudal, por questões logísticas, não foi seguido o protocolo mais adequado (referido no ponto 6 do capítulo 7), assim, os valores do caudal óptimo, eficiência e transmissividade devem ser considerados com reservas, mesmo assim o valor obtido para a transmissividade ($258,8 \text{ m}^2/\text{d}$) situa-se dentro da gama de valores mais frequentes estimados por Almeida *et al.* (2000) para as CAS implantadas no Pliocénico no sistema aquífero da margem esquerda da Bacia do Tejo-Sado (97 a $307 \text{ m}^2/\text{d}$).

Apesar dos constrangimentos encontrados na construção desta CAS, sublinha-se que a técnica de furação utilizada permite a execução de furos com grandes diâmetros e profundidades num período temporal curto. Face ao ambiente geológico/hidrogeológico em que foi aplicado e ao seu objectivo, considera-se que este é o melhor método disponível, permitindo construir furos de captação de água de forma eficiente.

A nível pessoal, o acompanhamento da construção da CAS CBR3 permitiu não só ilustrar a realidade prática da abordagem teórica inicialmente apresentada no presente trabalho, como também foi uma oportunidade única de estar em contacto com a actividade profissional do director técnico da empresa, ao nível do acompanhamento do projecto pré-definido e na tomada de decisões na construção destas estruturas, nomeadamente na classificação das amostras e definição dos níveis alvo de captação, a partir dos quais se definiu a posição dos tubos-ralo na instalação da coluna de revestimento.

9. Referências bibliográficas

ALMEIDA, C.; MENDONÇA, J.J.L.; JESUS, M.R.; GOMES, A.J. (2000) - Sistemas Aquíferos de Portugal Continental, Instituto da Água, 661 pp;

AZEVÊDO, M. T. (1982) - As formações quaternárias continentais da Península de Setúbal e sua passagem às formações litorais. Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, Coruña, 3, Geologia;

AZEVÊDO, M. T. (1983) - O sinclinal de Albufeira. Evolução pós-Miocénica e reconstituição paleogeográfica. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 302 pp;

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1983) – Hidrología subterránea. Editorial Omega, Barcelona, Vol.1 e 2, 2241 pp;

KRUSEMAN, G.P. & RIDDER, N.A. (1994) – Analysis and Evaluation of pumping test data, (Second Edition), International Institute for Land Reclamation and Improvement. The Netherlands, 372 pp;

GRAÇA, H. (2012) - Execução de uma captação, Caderno Técnico nº 2, Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascente, 217 pp;

INSTITUTO PORTUGUÊS DA QUALIDADE, I.P. (2012) - Comissão Sectorial para a Água – Manual de Boas Práticas para a Execução e Exploração de Furos de Captação de Águas Subterrâneas, 79 pp;

IPMA. Instituto Português do Mar e Atmosfera. Acedido em: <http://ipma.pt>;

MANUPPELLA G., ANTUNES M. T., PAIS J., RAMALHO M. M., REY J. (1999) - Carta Geológica de Portugal, na escala de 1:50 000. Notícia Explicativa da Folha 30-A (Lourinhã), IGM – Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa;

MEDEIROS, A. (2012) - Exploração de uma captação, Caderno Técnico nº 3, Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascente, 21 pp;

PAIS, J.; MONIZ, C.; CABRAL, J.; CARDOSO, J.L.; LENGONHA, P.; MACHADO, S.; MORAIS, M.A.; LOURENÇO, C.; RIBEIRO, M.L.; HENRIQUES, P.; FALÉ, P. (2006) - Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50 000. Notícia Explicativa da Folha 34-D (Lisboa), Serviços Geológicos Portugal, Lisboa, 73 pp;

MAOT. (2001) - Ministério da Administração Interna. Versão Provisória do Plano Nacional da Água;

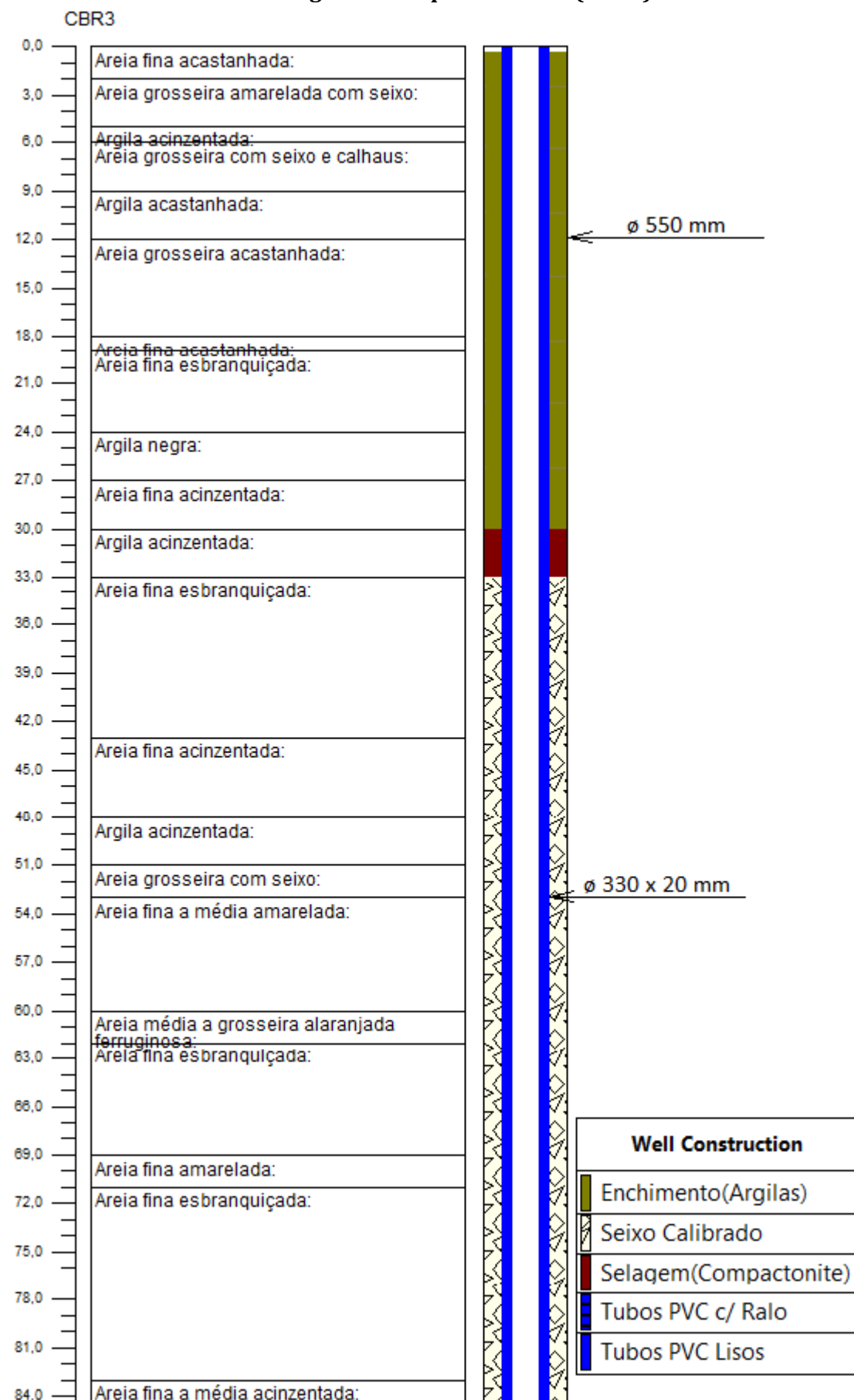
SILVA, A.V. (2012) – Implantação de uma captação, Caderno Técnico nº1, Associação Portuguesa dos Industriais de Águas Minerais Naturais e de Nascente, 27 pp;

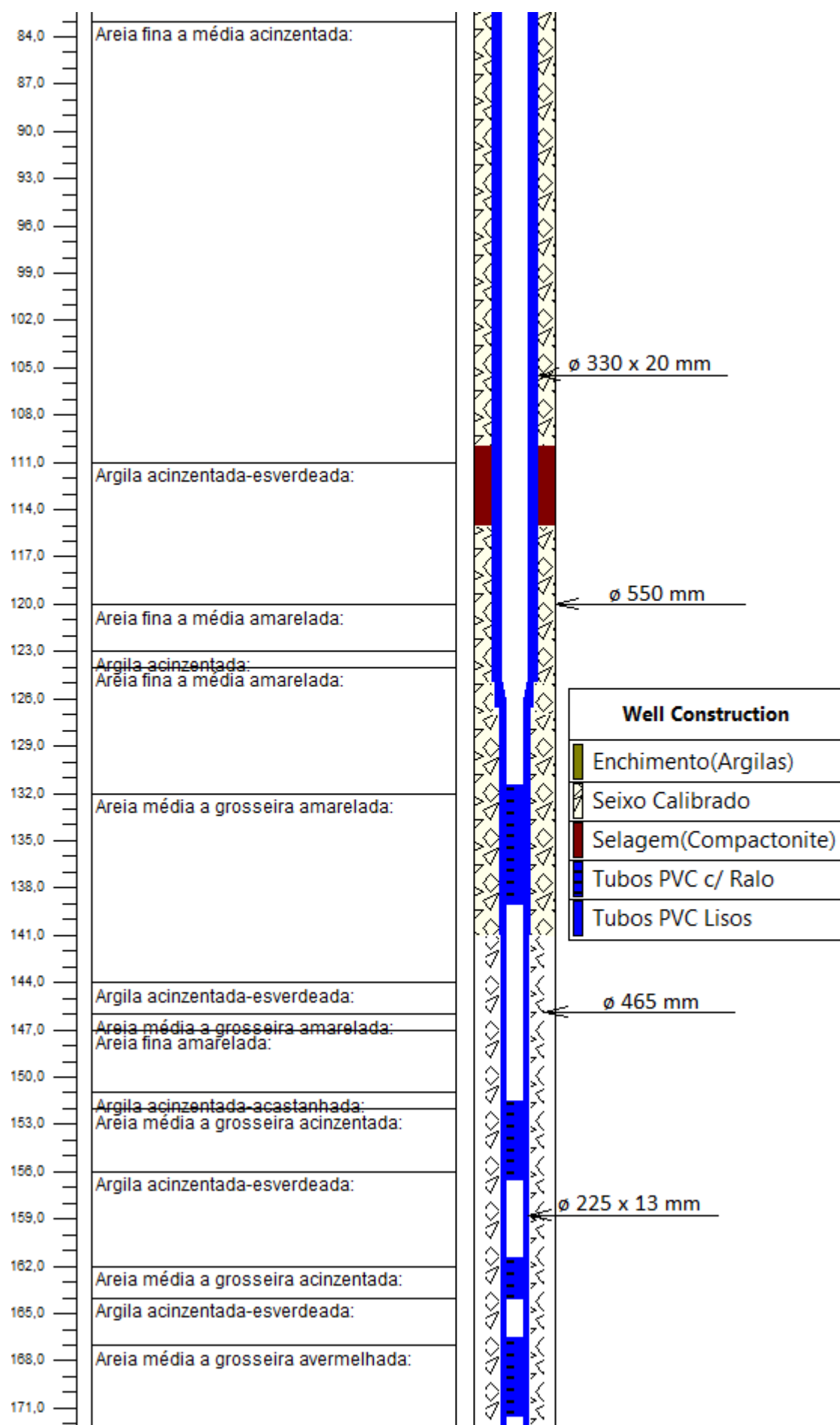
SIMÕES, M.M. (1998) – Contribuição para o conhecimento hidrogeológico do Cenozóico na Bacia do Baixo Tejo. Dissertação apresentada à Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia, Vol. I, 270 pp;

SNIRH. Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos. Agência Portuguesa do Ambiente. Acedido em: <http://snirh.pt>;

Todd, D.K., and Mays, L.W., (2005) – Ground-water hydrology (Third Edition): John Wiley and Sons, New York.

Anexo nº1 – Coluna litostratigráfica e esquema da CAS (CBR3)





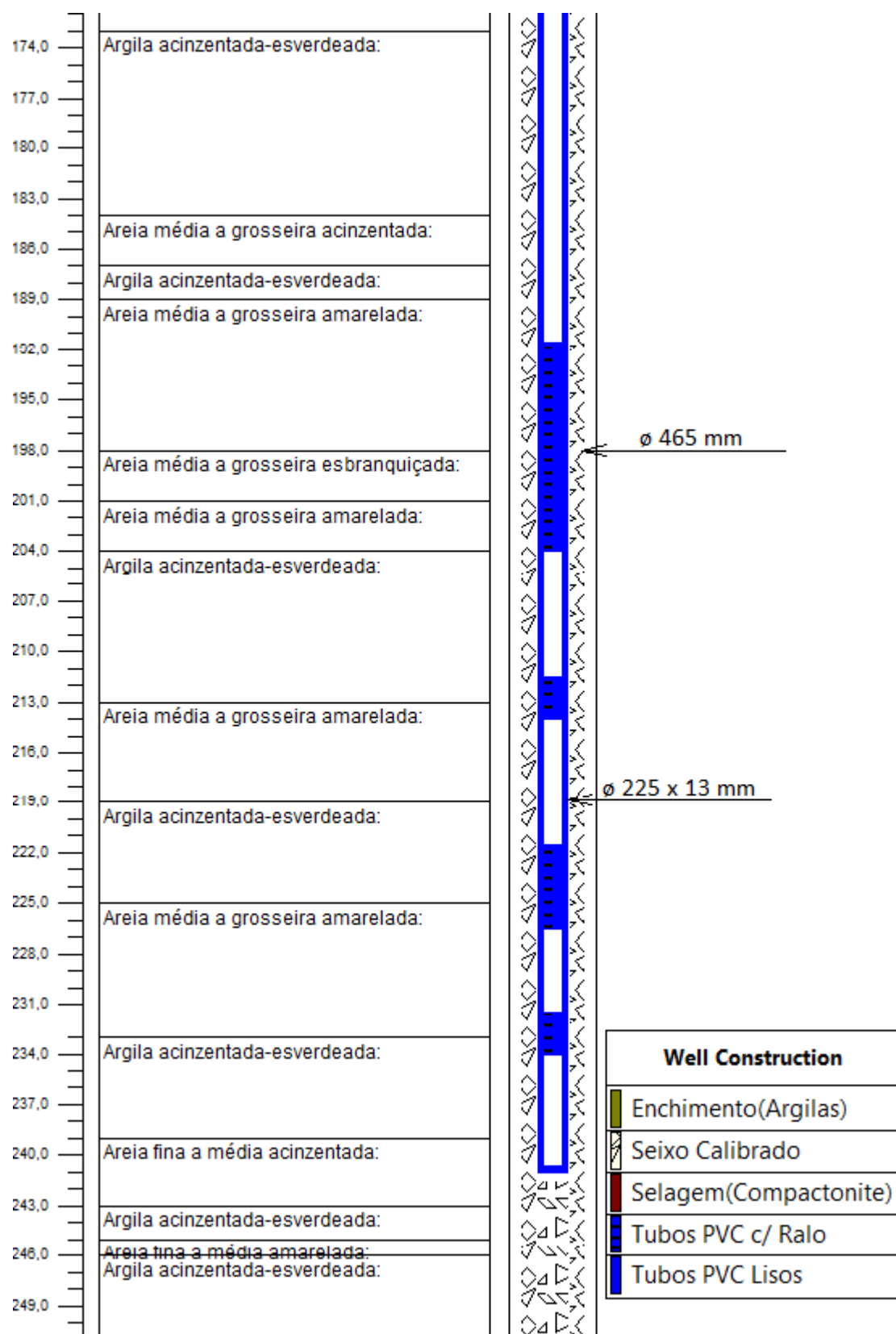


Figura 34 - Coluna litostratigráfica e esquema de construção da CAS CBR3.

Anexo nº2 – Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado na CAS CBR3

Tabela 7 - Registo dos rebaixamentos medidos no ensaio de caudal realizado em Nov-2015 na CAS CBR3.

Hora	Q (l/s)	Escalões	t (min)	s (m)	s _{ac} (m)	NHE (m)	NHD (m)
10:45	30	1º escalão de bombeamento	-	-	-	39,25	-
10:47			2	10,87	10,87		50,12
10:49			4	0,68	11,55		50,80
10:51			6	0,05	11,60		50,85
10:53			8	0,05	11,65		50,90
10:55			10	0,03	11,68		50,93
10:57			12	0,03	11,71		50,96
11:00			15	0,03	11,74		50,99
11:05			20	0,11	11,85		51,10
11:10			25	0,05	11,90		51,15
11:15	29,72		30	0,03	11,93		51,18
11:20	30,5		35	0,34	12,27		51,52
11:25			40	0,04	12,31		51,56
11:30			45	0,03	12,34		51,59
11:45			60	0,06	12,40		51,65
12:00			75	0,04	12,44		51,69
12:30			105	0,06	12,50		51,75
13:00			135	0,03	12,53		51,78
13:30			165	0,03	12,56		51,81
14:00			195	0,04	12,60		51,85
15:00			255	0,05	12,65		51,90
16:00			315	0,02	12,67		51,92
17:00	30		375	0,23	12,90		52,15
17:02	40	2º escalão de bombeamento	377	0,55	13,45		52,70
17:04			379	0,20	13,65		52,90
17:06			381	0,20	13,85		53,10
17:08			383	0,30	14,15		53,40
17:10			385	0,60	14,75		54,00
17:15			390	0,70	15,45		54,70
17:20			395	1,10	16,55		55,80
17:25			400	0,25	16,80		56,05
17:30			405	0,07	16,87		56,12
17:35			410	0,06	16,93		56,18
17:40			415	0,06	16,99		56,24
17:50			425	0,08	17,07		56,32
18:00			485	0,03	17,10		56,35
19:00			545	0,05	17,15		56,40
20:00			605	0,07	17,22		56,47
21:00			665	0,06	17,28		56,53
23:00			785	0,12	17,40		56,65
01:00			905	0,08	17,48		56,73
03:00			1025	0,09	17,57		56,82
05:00			1145	0,05	17,62		56,87
07:00			1265	0,03	17,65		56,90
09:00	40		1385	0,03	17,68		56,93